



“十二五”国家重点图书出版规划项目
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

软弱围岩隧道 稳定性变形控制技术

RUANRUO
WEIYAN SUIDAO
WENDINGXING
BIANXINGKONGZHI
JISHU

朱永全 李文江 赵 勇 / 著



人民交通出版社
China Communications Press



“十二五”国家重点图书出版规划项目
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

软弱围岩隧道 稳定性变形控制技术

RUANRUO
WEIYAN SUIDAO
WENDINGXING
BIANXINGKONGZHI
JISHU



朱永全 李文江 赵 勇 / 著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书系统介绍了软弱围岩隧道空间施工变形特征和变形的主要影响因素,进行了隧道体系、不同施工阶段隧道稳定性及极限位移的定义,介绍了基于塑性应变突变理论的围岩稳定性分析方法和极限位移的确定方法,给出了基于非线性屈曲原理的支护结构承载能力分析方法,并提出了软弱围岩隧道变形控制基准,还介绍了包括开挖、支护、掌子面稳定、拱脚稳定、支护补强、超前支护以及空间变形监测与反馈在内的软弱围岩隧道变形控制技术体系,以及软弱围岩安全施工方法及有关建议。

本书强调理论与实践相结合,从理论分析、数值模拟和现场试验等方面论述软弱围岩施工大变形的特点和变形控制技术。全书共分八章,主要包括绪论、软弱围岩隧道变形特征分析、软弱围岩隧道大变形影响因素研究、软弱围岩隧道稳定性判别技术研究、软弱围岩施工技术现状及建议、软弱围岩隧道变形控制关键技术、软弱围岩隧道施工变形控制基准研究等内容,最后给出结语。

本书可供隧道工程科研、设计、施工技术人员参考,亦可作为研究生教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

软弱围岩隧道稳定性变形控制技术 / 朱永全, 李文江, 赵勇著. —北京: 人民交通出版社, 2012. 9

ISBN 978-7-114-10043-7

I. ①软… II. ①朱… ②李… ③赵… III. ①隧道—围岩稳定性—研究 IV. ①U451

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 200207 号

书 名: 软弱围岩隧道稳定性变形控制技术

著 作 者: 朱永全 李文江 赵 勇

责任编辑: 刘彩云

出版发行: 人民交通出版社

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) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 720 × 960 1/16

印 张: 13.75

字 数: 220 千

版 次: 2012 年 9 月 第 1 版

印 次: 2012 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10043-7

定 价: 45.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



软弱围岩隧道稳定性变形控制技术

前 言

据统计,截至 2010 年年底,我国已建铁路隧道总长度超过 7000km,在建铁路隧道总长度超过 7500km,正在设计和规划建设的隧道总长度超过 10000km,但是我国铁路隧道修建的技术水平、施工装备、安全质量控制与管理等与发达国家相比还存在较大的差距。分析中国铁路隧道工程的建设现状,我们认为当前困扰广大隧道建设者的主要问题是软弱围岩隧道的设计与施工技术问题。这些隧道通常表现为围岩变形大,甚至发生坍塌等安全事故;变更设计多,投资难以控制;施工进度缓慢,严重制约工期等。例如,即将开工修建的成(都)兰(州)铁路成都至哈达铺段,全长 459km,其中设计隧道 36 座,长度 323km,占正线总长的 70% 以上,主要地质问题是活动断裂多、软岩分布多、地应力高、岩溶发育;全线隧道以千枚岩、板岩为主,软岩地层占隧道总长的 53%,高地应力软弱大变形问题将是成兰铁路的最突出难题。据统计,在建的 7500km 铁路隧道中,有 30% ~ 40% 属于软弱围岩,长度超过 2500km,并且正在设计和规划修建的铁路隧道中,软弱围岩所占的比重更大。因此,解决软弱围岩隧道的设计和施工问题已经迫在眉睫。

由于对隧道围岩变形和控制理论缺乏系统研究,因此隧道设计和施工的工程措施缺乏针对性,施工安全难以保证,工程投资难以有效控制。其原因主要是前期地质勘察工作不到位,对软弱围岩隧道特别是大断面软弱围岩隧道的工程特性、变形机制、发展演化规律等认识不足,设计采取的控制技术和施工方法缺乏针对性等。因此,在大规模铁路隧道建设的新阶段,需要加强系统的理论研究,提高设计质量,以适应现代隧道建设的迫切要求。

软弱围岩一般指强度低、孔隙度大、胶结程度差、受构造面切割及风化影响显著的松、散、软、弱围岩。对于隧道工程而言,在一定地应力水平(或埋深)条件下,软弱围岩极易产生较大的施工变形。本书将针对性地介绍软弱围岩隧道掌子面前方的先行变形、掌子面变形和后方收敛变形的隧道空间变形特征,分析围岩性质、隧道埋深、地应力水平和断面形式等因素对隧道变形的影响。对不同施工阶段隧道体系的极限状态

进行定义,介绍了基于塑性应变突变理论的围岩稳定性分析方法、基于非线性屈曲原理的支护结构承载能力分析方法和软弱围岩隧道稳定性位移判别方法,给出了隧道体系稳定极限位移,提出了支护合理作用时机。根据软弱围岩隧道施工过程中各工况下隧道变形的计算统计结果、典型隧道现场测试统计结果以及计算极限位移和支护结构承载能力等,同时借鉴了相关工程的成功经验,提出了软弱围岩隧道变形控制基准。借鉴国内外相关工程经验,提出了施工变形应对措施方案。本书还介绍了开挖、支护、掌子面稳定、拱脚稳定、支护补强、超前支护以及空间变形监测与反馈等技术的软弱围岩隧道变形控制技术体系,以及软弱围岩安全施工方法及相关建议。

本书是“黄土隧道施工地表裂缝规律与形成机理及其控制研究”[国家自然科学基金项目(50978172)]、“隧道稳定性空间位移判别技术研究”[国家自然科学基金项目(51078243)]、“隧道施工过程力学及安全施工技术研究”[铁道部科技开发项目(2009G005-C)]和“软弱围岩隧道支护参数与变形控制技术研究”[铁道部科技开发项目(2011G026-J)]等研究成果的总结。参加上述项目理论与试验研究以及本书撰写的有朱永全、李文江、赵勇、刘建友、刘志春、刘勇、孙新亮、朱正国、高新强、宋玉香、张素敏、贾晓云、李红建、韩先民、于跃勋、赵玉成、刘尧军等。感谢课题组成员所作的贡献,特别感谢刘志春等在乌鞘岭隧道、两水隧道和孙明磊、刘建友等在天平山隧道现场试验工作中所作的贡献,感谢景诗庭教授为本书提出了许多宝贵意见。

由于时间仓促且水平有限,书中疏漏和不妥之处在所难免,恳请广大专家和读者给予批评指正。

作 者

2012年5月

软弱围岩隧道稳定性变形控制技术

目 录

第1章 绪论	1
1.1 软弱围岩的含义及其工程特征	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书的研究重点和主要成果	17
第2章 软弱围岩隧道变形特征分析	19
2.1 软弱围岩隧道变形特征的研究意义和手段	19
2.2 工况及计算模型	20
2.3 洞周位移发展规律	23
2.4 掌子面挤出变形特征	29
2.5 拱脚变形特征	40
2.6 小结	44
第3章 软弱围岩隧道大变形影响因素研究	46
3.1 软弱围岩隧道大变形问题	46
3.2 软弱围岩隧道大变形机理的解析分析	48
3.3 软弱围岩隧道大变形机理的数值分析	50
3.4 小结	61
第4章 软弱围岩隧道稳定性判别技术研究	62
4.1 隧道体系	62
4.2 施工过程软弱围岩隧道稳定性	63

4.3	软弱围岩稳定性判别技术研究	64
4.4	隧道结构体系稳定性判别	78
4.5	基于屈曲原理的支护结构稳定性判别技术	87
4.6	小结	96
第5章	软弱围岩施工技术现状及建议	98
5.1	软弱围岩隧道的常用施工方法	98
5.2	黄土隧道施工方法的对比分析	104
5.3	软弱围岩隧道安全施工的基本原则与理念	113
5.4	软弱围岩隧道安全施工建议	116
5.5	小结	140
第6章	软弱围岩隧道变形控制关键技术	141
6.1	软弱围岩隧道变形控制理念与技术体系	141
6.2	工法要素优化研究	143
6.3	双层支护技术	154
6.4	长锚杆(索)控制变形技术	159
6.5	拱脚变形控制技术	161
6.6	掌子面挤出变形控制技术	166
6.7	超前支护技术	172
6.8	支护补强控制变形技术	173
6.9	空间变形监测技术	175
6.10	小结	178
第7章	软弱围岩隧道施工变形控制基准研究	180
7.1	软弱围岩隧道施工变形控制基准制订的基本思路	180
7.2	常规预留变形量统计	180
7.3	典型实测变形样本统计分析	181
7.4	隧道施工变形与极限变形的关系	182
7.5	隧道变形控制基准的相关经验成果	183
7.6	管理控制限值的制订	185
7.7	软弱围岩隧道施工变形应对措施	186

7.8 典型工程应用实例	186
7.9 小结	192
第8章 结语	193
附录	195
附录1 IV级围岩单线隧道变形成果汇总	195
附录2 V_a 级围岩单线隧道变形成果汇总	196
附录3 V_b 级围岩单线隧道变形成果汇总	197
附录4 IV级围岩双线隧道变形成果汇总	198
附录5 V_a 级围岩双线隧道变形成果汇总	199
附录6 V_b 级围岩双线隧道变形成果汇总	200
附录7 典型双线隧道现场量测变形统计	201
参考文献	203

第1章 绪 论

1.1 软弱围岩的含义及其工程特征

围岩是指隧道周边一定范围内的岩体,从力学角度出发,这部分岩体在隧道施工过程中将产生明显的应力重分布现象;从工程意义上讲,该部分岩体对施工过程中洞室稳定性产生直接影响。根据隧道施工力学原理,围岩的范围一般指隧道开挖洞径的3~5倍。

软弱围岩一般是指质软、结构松散、破碎的围岩。根据目前铁路隧道围岩分级方法,该类围岩一般属于V、VI级围岩,对于大断面或特大断面隧道,还包括一部分IV级围岩。文献[1]从地质学角度出发,将软弱围岩分为低强度软岩、高应力软岩、节理化软岩和复合型软岩等。总体上讲,软弱围岩整体强度相对较低,在一定地应力水平(或埋深)条件下,极易产生较大的施工变形和洞室失稳现象。

软弱围岩的工程特征主要表现为岩石强度低、岩体结构面发育、对工程扰动的反应灵敏和变形持续时间长等,下面简要描述:

(1) 岩石强度低

岩体一般由结构体(岩块)和结构面构成,其中岩块是构成岩体结构的基本骨架,其强度的高低直接影响着围岩的整体强度性质。我国相关标准或规范一般将单轴饱和强度小于30MPa(国际上一般为25MPa)的岩石称为软岩。这一类岩石主要包括弱胶结岩石和含有弱矿物的岩石。其中,弱胶结岩石主要是指第三系以后的低固结、未固结的砂岩、泥岩以及火山灰质岩石;弱矿物岩石主要包括泥质岩组、含煤岩组、含盐岩组、含石膏岩组、云母片岩以及滑石片岩组等。

(2) 岩体结构面发育

结构面是岩体的主要组成单元,岩体的工程性能与结构面的分布、性质和力学

特性有密切关系,特别是结构面的产状、切割密度、粗糙度、起伏度、延展性、黏结力以及充填物的性质等,都是评价岩体强度和稳定性的重要依据。软弱围岩一般结构面均相对发育,尤其当结构面填夹软弱充填物时,即便岩块坚硬,岩体的整体强度和自稳性都表现出相对较弱的宏观属性。

(3) 对工程扰动的反应灵敏

隧道施工打破了地层的初始平衡状态,洞室周边一定范围内的岩体应力将发生重分布现象。在洞周围岩应力调整过程中,若能够形成自然拱,则洞室稳定,若不能有效形成自然拱,则洞室易失稳。由于软弱围岩整体强度较低,施工作业(开挖、爆破)对围岩的扰动程度和扰动范围均相对显著。对于浅埋隧道,当施工扰动范围波及地表时,容易发生洞室坍塌现象,因此施工中应采取有效的预支护或地层预加固措施,以维持洞室稳定;对于深埋隧道,由于地应力相对较高,在洞周容易产生较大范围的屈服区域,当屈服区发展到一定程度时,区内围岩易出现塑性流动变形,从而导致宏观大变形现象的发生。实测数据表明,深埋软弱围岩隧道洞周变形可达数十厘米,如兰武二线乌鞘岭隧道岭脊段最大水平收敛 1209mm,最大拱顶下沉达 1053mm;兰渝线两水隧道最大水平收敛 499mm,最大拱顶下沉达 757mm。大变形隧道往往伴随有初期支护喷层开裂脱落、钢架扭曲,甚至二次衬砌开裂等现象的发生。

(4) 变形持续时间长

软弱围岩常常具有明显的蠕变特性。根据岩体力学相关研究结果,围岩的蠕变特性不仅与岩性有关,而且与围岩的赋存条件(如埋深、地应力水平、地下水条件等)也密切相关。一般情况下,黏性介质含量较高的岩体(如页岩、泥岩等)蠕变宏观特性相对明显,而花岗岩、安山岩等坚硬岩石蠕变变形相对较小,而且在很短时间内即趋于稳定;埋深较大或在地应力地区(开挖扰动后,二次应力水平大于蠕变下限时),软弱围岩的蠕变特性相对明显,隧道开挖后变形时间相对较长,若控制不当易发生洞室失稳现象,如乌鞘岭隧道岭脊千枚岩地段,最大埋深约 1050m,隧道修建过程中变形持续时间达半年以上。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 软弱围岩隧道变形特征研究现状

隧道是由围岩和支护共同构成的复杂体系,受其地质复杂性和施工环境多变

性影响,其施工力学效应也往往表现出多样性。施工变形是隧道施工效应的综合宏观表现,通过变形量值及变形发展状态的观察与测试可以判断出围岩及支护结构的稳定状态,也可以对其后期的发展趋势做出预测。软弱围岩由于其自身强度低,在一定工程背景条件下往往表现出变形量级大、变形发展快的特点,施工中一旦控制不当,容易产生支护开裂、侵限现象,甚至产生坍塌。因此,对于软弱围岩隧道,充分研究施工过程中变形的时空展布特征,对指导设计与施工具有重要意义。

真正意义上的隧道变形特征研究应该开始于新奥法基本原理被提出以后。新奥法由奥地利学者拉布西维兹于20世纪50年代提出,70年代被引入我国,并对我国隧道工程建设产生了重大的影响,其基本思想是充分利用围岩的自承能力和开挖的空间约束作用,采用锚杆和喷射混凝土及时对围岩进行加固,约束围岩的松弛和变形,并通过施工监控量测来指导隧道和地下工程设计施工。根据新奥法的基本原理,人们关注的重点主要集中在开挖以后的洞周径向变形上。在这期间,针对软弱围岩隧道洞周变形问题,开展了大量的理论及实测技术研究,取得了丰富的成果,这些成果至今对隧道工程设计与施工仍发挥着重要作用。

意大利人Pietro Lunardi在研究围岩的压力拱理论和新奥法施工理论的基础上提出了岩土控制变形分析(ADECO-RS)施工工法,近年来,该工法被广泛应用于意大利的公路及铁路领域,并纳入规范^[2-7]。目前该工法也被一些主要欧洲国家广泛应用在大型隧道工程中。该工法认为,施工过程中隧道变形表现出明显的空间效应,即由掌子面到达前的预收敛变形、掌子面挤出变形和掌子面开挖后的收敛变形组成,其中,挤出变形和预收敛变形发生在前,洞周收敛变形发生在后,前者是后者发生的真正原因;超前变形的大小取决于其地层超前加固的强度和刚度,因此,可以通过调节地层超前加固的强度和刚度来实现对其变形的控制,从而控制隧道的洞周收敛变形,并确保隧道的长期稳定。相比于新奥法,ADECO-RS工法更重视对掌子面及其前方的变形分析与控制,并且这一思想被贯彻到实际工程中。

近年来,随着我国软弱围岩大变形隧道建设数量的不断增多,相关领域也开展了大量的研究工作,取得了丰硕成果。软弱围岩隧道变形特征的分析手段主要有理论分析、现场测试以及模型试验等。

在理论研究方面,很多学者对隧道施工力学响应的解析解进行了深入研究。文献[8]考虑了岩体屈服后塑性剪胀扩容及应变软化现象,并基于开尔文模型建立了新的解析解;文献[9]将锚杆加固区按Kelvin-Hooke模型分析了围岩流变对围

岩稳定性的影响;文献[10]在 Poyting-Thomson 模型的基础上建立了围岩的黏弹性解析模型,并结合典型工程监控量测实践,分析了初期支护对围岩稳定性和位移的影响。杨小礼在考虑软岩的剪胀、蠕变和非线性破坏准则等基础上,推导隧道围岩的变形表达式^[11-15];罗清明考虑了软岩的塑性大变形特性,并根据不同流动法则,推导出圆形隧道位移解^[16]。解析解一般均是建立在具有一定代表性意义的假设基础上的,受实际工程复杂多变环境的影响,其计算结果往往在数值上与实际情况存在较大差异。目前,数值分析已经成为岩土工程分析的重要手段。结合现场试验或反演技术选择合理计算参数,在此基础上所建立的数值模型更能反映出施工现场的实际情况,其计算结果对指导设计与施工也更具指导意义。段庆伟基于摩擦接触型界面单元,对穿越断层带隧道施工变形进行了数值模拟分析^[17];何满潮分别采用与转动、形变的先后运动次序有关的和分解和极分解定理,并结合拖带坐标系、随材料与网格变形不断更新坐标的大变形数值技术,对软岩工程岩体的大变形过程进行了分析^[18-22];李晓红采用横观各向同性弹塑性本构模型对深埋隧道层状围岩变形特性进行了分析,其计算结果较好地反映了现场实际情况^[23];赵瑜基于摩尔—库仑剪破坏与拉破坏复合的应变软化模型,通过三维数值手段,对高应力区隧道围岩变形及破坏特征进行了分析研究^[24-25];赵旭峰采用三维非线性黏弹性数值模型对深部软岩隧道工程中变形时空效应进行计算模拟,并结合现场实测结果,得出了在作业面影响范围内开挖面空间效应占主导因素,在此范围外软弱岩体流变属性得以充分发挥的重要结论^[26-27]。采用数值方法对软弱围岩大变形问题进行分析时,其关键在于围岩特性及其计算参数的选定。根据目前技术现状,围岩特性及计算参数一般均通过物理试验或结合现场测试通过反演技术等手段获得。考虑到数值模拟中计算参数选择的随意性问题,因此,数值计算结果需在现场实测印证的基础上,才能更好地发挥其指导作用。

根据当代隧道施工技术要求,施工监测及信息反馈被认为是隧道施工过程中必不可少的环节。因此,在隧道(尤其是软弱围岩隧道)建设过程中,通过现场监测资料分析软弱围岩大变形特征的研究成果十分丰富^[28-53]。其中刘志春结合乌鞘岭隧道岭脊试验段对深埋软弱围岩隧道施工变形进行了系统的分析和汇总,并在此基础上开展了大变形分级及二次衬砌施作合理时机的研究;冷希乔结合郑西铁路大断面黄土隧道,对 CRD 法施工过程中洞周变形随开挖步的变化规律进行了分析和研究,并在此基础上,针对 CRD 法对大断面黄土隧道的适用性及可能出现的

问题进行了初步探讨;张文强根据兰渝铁路木寨岭隧道斜井施工实际情况,通过对变形监测数据的统计分析,将软岩大变形划分为三种增长类型,并在此基础上对隧道支护结构形式提出了合理化建议。

从目前国内关于软弱围岩变形规律的研究现状来看,无论是理论研究还是现场试验,其研究重点基本集中在隧道开挖后的洞周变形上。受认识水平和监测技术的限制,关于掌子面前方及掌子面变形的研究成果不多。而根据 ADECO-RS 工法基本原理,对于软弱围岩,恰恰是掌子面及其前方围岩变形的控制效果才是影响隧道整体稳定和变形量级的关键,为此,系统深入地开展隧道三维空间全过程变形特征研究,应该是关于软弱围岩隧道的重点研究工作之一。

1.2.2 关于软弱围岩大变形问题

1) 大变形的界定

大变形是相对正常变形而言,目前还没有统一的定义和判别标准。各类围岩在正常施工条件下都会产生一定的变形。现行的铁路隧道设计规范、公路隧道设计规范、新奥法指南及衬砌标准设计等都根据多年经验及统计,对各级围岩及各种支护结构制订了不同的预留变形量,以容纳这些正常变形。

铁二院从预留变形量出发,认为正常预留变形量对于单线隧道一般不大于 150mm,对于双线隧道不大于 300mm,并粗略取上述值的 4/5 作为正常变形值的上限,当单线隧道支护位移大于 130mm,双线隧道支护位移大于 250mm 时,即认为发生了大变形^[54]。张祉道建议以初期支护位移值以及支护破坏现象作为定义指标,并将大变形定义为:当采用常规支护隧道由于地应力较高而使其初期支护发生程度不同的破坏且位移与洞壁半径之比大于 3% 时,认为发生了大变形^[55]。

卞国忠从围岩变形量上给大变形作了界定^[56],即若围岩变形量超过正常规定的 2 倍时,可把围岩变形视为大变形(南昆线家竹箐隧道的经验是单线超过 25cm,双线超过 50cm 确定为大变形),围岩变形量介于正常预留变形量及其 2 倍之间时,可认为是正常变形至大变形的过渡阶段。

何满潮认为大变形问题有弹性大变形和塑性大变形之分,而软弱围岩的大变形问题可归结为塑性大变形,塑性大变形区别于弹性大变形和小变形的显著标志是前者与过程紧密相关^[57]。也有学者指出,大变形是隧道施工过程中,围岩在复杂外部环境作用下,其自承能力的丧失或部分丧失,进而发生塑性破坏的现象。与

一般岩体局部破坏(如岩爆、坍塌)的区别在于这种塑性破坏具有显著的持续性和时间效应。

2) 大变形的发生机理

1946年 Terzaghi 首先提出挤出围岩和膨胀围岩的概念。受其影响,后来国际上普遍按形成机理将大变形分为两大类:即施工过程中由于应力重分布结果超过围岩强度而产生的塑化变形和围岩遇水后发生膨胀作用而产生的变形^[58]。在此基础上,文献[59]从地质条件出发,认为围岩产生大变形的原因可能有三种:膨胀岩的作用、高地应力作用和局部水压及气压力的作用。而局部水压及气压力的作用仅当支护和衬砌封闭较好,周边局部地下水升高或有地下气体(瓦斯等)作用时,才使支护产生大变形,这种现象并不多见。陈宗基教授将大变形产生的原因总结为5个方面,即塑性楔体的产生、流动变形(包括塑性流动和黏性流动)、围岩膨胀、扩容和层状岩体的挠曲。姜云将围岩大变形的发生机制归结为软弱围岩塑流、膨胀变形、层状岩体的板梁弯曲变形、塑性楔体、结构性流变、累进松脱扩展、差异性松脱、倾斜沉降变形和垂直沉降变形9个方面。其中,累进松脱扩展和差异性松脱一般在浅埋、低应力区发生,而倾斜沉降变形和垂直沉降变形主要发生在下卧采空区^[60]。

3) 大变形的类型

根据受控条件,大变形可以分为受围岩岩性控制型、受围岩结构构造控制型和受人工采掘扰动影响型三大类型^[61]。

(1) 围岩岩性控制型

软弱围岩类,包括千枚岩、炭质板岩、泥质页岩和砂质泥岩、泥灰岩以及一些具有膨胀性的软弱围岩等。这一类围岩在高应力状态下将产生塑性变形,在地下水的参与下岩体软化现象明显,当膨胀性矿物成分较高时也会发生显著的膨胀变形。根据围岩结构面的发育状态,可将其进一步划分为均质型、层状型、互层状型。这一类围岩的变形破坏形式一般为由于剪切变形或弯曲变形产生的塑性流动。

(2) 岩体结构控制型

这种变形类型主要发生在结构构造发育的硬质岩中。这种岩体一般岩块坚硬,但由于受其结构特征的影响,围岩整体强度以及变形特性均明显受控于围岩应力环境,隧道开挖前,处在高围压状态时围岩尚具有较高的强度和稳定性,但在隧道开挖卸载过程中,随着围压降低、围岩应力差增大,结构面张开或滑移,围岩整体

强度和模量随之降低,这时即表现出显著的结构流变的特点。按照岩体结构面类型又可划分为构造改造型和浅表次生改造型。其中按结构面发育情况,可进一步划分为块裂状、碎块状和碎屑状三种结构类型。

(3) 人工采掘扰动控制型

这种类型,一般是由于受人工扰动的岩体(如采空区周边岩体)发生移动从而导致隧道围岩的大变形。这类围岩的变形破坏主要表现为剪切和滑动破坏,多发生于相对厚层的沉积岩中,具体表现为沿层面的滑动破坏和完整岩体的剪切破坏两种形式。根据采空区岩层走向与隧道的空间关系,可进一步划分为倾斜型和水平型两种形态。

1.2.3 典型工程实例

国内外软弱围岩大变形隧道较多,比较典型的有奥地利的陶恩隧道^[62-66]和阿尔贝格隧道^[67-69]、日本的惠那山隧道^[70-72]、中国的南昆线家竹箐隧道^[73-78]和乌鞘岭隧道^[79-91]以及木栅公路隧道等。

(1) 陶恩(Tauern)隧道

陶恩隧道 1970 ~ 1975 年修建于奥地利,为双向行驶的公路隧道(单洞),全长 6400m,埋深 600 ~ 1000m。新奥法的鼻祖 Rabcewicz 教授亲自主持该隧道的设计并参加施工。该隧道施工中在千枚岩和绿泥石区段发生了大变形,变形量达到 500 ~ 1200mm,最大变形速率达 200mm/d,是世界上第一座知名的大变形隧道。在设计时,由于对大变形隧道缺乏经验,初期支护较弱(长 4m 锚杆,厚 250mm 喷混凝土,TH36@750 钢架)。当发生大变形后,Rabcewicz 采取了长锚杆(6 ~ 9m)、可缩式钢架以及喷层预留纵缝等加强措施,并对侵限部位进行了危险的扩挖作业,施工非常艰难,但最后仍取得了成功。

(2) 阿尔贝格(Arlberg)隧道

阿尔贝格隧道全长 13980m,为长大公路隧道。该隧道是紧接着陶恩隧道之后开工的(1974 ~ 1979 年),设计时已吸收了陶恩隧道的经验教训,施工较为顺利。

隧道最大埋深 740m,原始地应力 13MPa,围岩为千枚岩、片麻岩、含糜棱岩的片岩绿泥石等,抗压强度为 1.2 ~ 2.9MPa。为防止大变形,设计时采用了强大的初期支护系统:厚 200 ~ 250mm 喷混凝土,间距 750mm 的可缩式钢架,6m 长的系统锚杆。虽然如此,在局部地质较坏的地段,仍产生了 200 ~ 350mm 的支护位移,变形

初速度达到 $40 \sim 60\text{mm/d}$, 最大达 115mm/d 。在增加了 $9 \sim 12\text{m}$ 的长锚杆后, 使变形初速度降为 50mm/d 。据统计, 每延米隧道锚杆用量达 420m 。

(3) 惠那山 (Enasan) 隧道

惠那山隧道为双洞隧道, 位于日本中央公路的两宫线上。I 号隧道先修, 于 1975 年 8 月建成, 全长 8300m , 为双向行驶的公路隧道。后由于交通量的增加, 1978 ~ 1985 年修建完成第二座隧道, 即 II 号隧道, 隧道全长 8635m 。这两座隧道平行, 通过的地层相同, 其中 400m 的长平泽断层带非常软弱, 为风化变质角砾岩 (已黏土化), 其单轴抗压强度仅 $1.7 \sim 4.0\text{MPa}$, 该处隧道埋深约 400m 。值得一提的是, 为通过这一条断层, I 号隧道采用刚性支护, 而 II 号隧道采用新奥法的柔性支护, 其施工控制效果大为不同。

I 号隧道采用的断面如图 1-1 所示。主洞开挖时先设置了间距为 0.8m 的重型钢架 (H250), 并辅以衬板, 先后浇筑了两层模筑混凝土。施工过程中, 由于变形很快并且量值较大, 钢架被大量破坏, 因此, 在浇筑第二层混凝土时又补充了间距 0.8m 的 H200 钢架。虽然模筑混凝土衬砌总厚达 1.2m , 而且设置了大量的重型钢架, 衬砌仍然发生了大规模的开裂, 最后不得不采用钢纤维加筋混凝土进行反复修补。

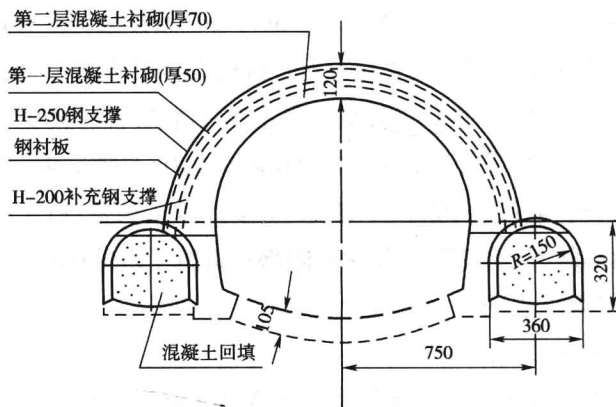


图 1-1 惠那山 I 号隧道刚性支护示意 (尺寸单位: cm)

II 号隧道采用了柔性初期支护, 其具体参数为: 长 6m 的系统锚杆 (施工中加长到 $9 \sim 13.5\text{m}$); 预留变形量 (上半部为 500mm , 下半部为 300mm); 厚 250mm 的钢纤维喷混凝土及可缩式钢架; 素混凝土二次衬砌, 厚度 450mm 。隧道断面见图 1-2, 最终发生的初期支护位移为 $200 \sim 250\text{mm}$, 最大 560mm , 说明长锚杆发挥了作用。

(4) 家竹笋隧道

南昆铁路家竹笋隧道在国内是著名的险洞(单线铁路隧道),以高瓦斯、高地应力、大涌水而著称。由于煤系地层区段围岩软弱($R_b = 1.7\text{MPa}$),且地应力相对较高(16.09MPa),在390m长的地段内产生了大变形,水平收敛600~800mm(最大达1600mm),拱顶沉降接近1000mm。变形之所以这么大,是因为设计阶段对大变形缺乏判断,以为只是一般的软弱地层,未考虑高地应力的影响,所以设计中只采用了一般标准的初期支护(这一点和陶恩隧道相似)。施工中根据变形情况,通过一系列的技术调整,才使隧道得以成功建成。这些措施包括:优化洞形,加大边墙曲率;加大预留变形量(拱部:450mm,边墙:250mm);加长系统锚杆至4~7m;增加喷混凝土厚度(初喷200mm,复喷150mm),并设三道纵缝;钢架改为U29U形可缩式;双层模筑混凝土衬砌,其中外层为550mm钢纤维钢筋混凝土,内层为250mm钢纤维混凝土,两层衬砌之间设HDPE瓦斯隔离层。

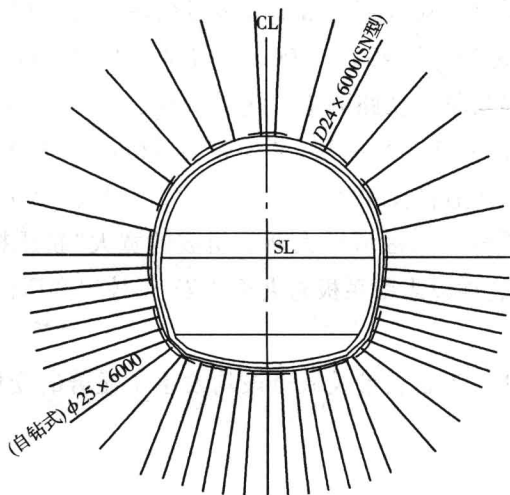


图 1-2 惠那山 II 号隧道初期柔性支护示意

(5) 木栅隧道

台湾北部第二高速公路木栅隧道,全长1875m,为三车道公路隧道(断面面积 150m^2)。当隧道通过潭湾大断层(宽75m)时,发生了大变形(大变形地段长205m),拱顶下沉1500mm以上,边墙收敛1400mm。

产生严重大变形的原因是初期仅采用常规的锚喷支护。在大变形隧道整治过