

Gonglu Suidao

Sheji yu

Shigong Xinfu

Jiqi Yingyong

公路隧道设计与 施工新法及其应用

朱汉华 尚岳全 杨建辉 文献民 曲晨 王迎超 编著



人民交通出版社
China Communications Press

公路隧道设计与施工新法及其应用

Gonglu Suidao Sheji yu Shigong Xinfu Jiqi Yingyong

朱汉华 尚岳全 杨建辉 编著
文献民 曲 晨 王迎超

人民交通出版社

内 容 提 要

本书主要介绍公路隧道的设计及新奥法、浅埋暗挖法、矿山法等隧道施工方法及其应用,并阐述了隧道围岩稳定基本理念、隧道受力的独立性、隧道施工合理工法的选择、不合理工法导致的灾害问题、复杂条件下隧道工法的研究、隧道围岩稳定与施工安全技术、结构衬砌与防水设计及隧道特殊问题等。

本书可供隧道设计与施工技术人员使用,也可供相关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

公路隧道设计与施工新法及其应用/朱汉华等编著.

—北京:人民交通出版社,2010.5

ISBN 978-7-114-08295-5

I. ①公… II. ①朱… III. ①公路隧道—隧道工程—设计②公路隧道—隧道工程—工程施工 IV. ①U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 043668 号

书 名:公路隧道设计与施工新法及其应用

著 者:朱汉华等

责任编辑:曲 乐 郑薰林

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:北京牛山世兴印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:12.75

字 数:295千

版 次:2010年6月 第1版

印 次:2010年6月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-08295-5

印 数:0001—3000册

定 价:32.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

通过近两个世纪的探索,山岭隧道建设形成了多种设计理论和工法,如新奥法、浅埋暗挖法、矿山法等。这些设计理论和工法在实践中发挥了十分重要的作用,但也出现了一些问题,甚至是血的教训。作者在总结近千座隧道工程的成功经验与教训及分析延安窑洞和龙游石窟等历史经典工程成功实例的基础上,得出如下基本认识:(1)隧道工程结构与材料组合设计、施工与养护全过程都必须与周围相关环境协同作用,并符合结构强度、刚度和稳定等力学规律,然而后两者往往容易被忽视。特别是在施工、养护中的每个步骤或者使用过程中的每时段,隧道围岩、支护和材料组合都必须满足三维力学平衡、三维力与变形协调及三维变形协调与稳定(否则会改变三维力学平衡形式)。(2)在满足自然规律条件下,应充分发挥主观能动性,寻找或选择合适的方法、手段、材料、结构形式等,以确保工程质量与安全。如果某个过程甚至某个时段不符合力学规律,就容易造成工程失效事故。

以新奥法为代表的现代工法,提出了保障隧道围岩稳定的基本理念,即“充分发挥围岩的自承能力”。实践中应该把复杂工程问题转化为简单力学问题,并注重施工养护工艺和结构构造,采用“基本维持围岩原始状态”的理念,使隧道围岩与支护结构共同作用以达到足够强大,形成稳定的平衡体系,避免围岩出现有害的过大变形,实现“基本维持围岩原始状态”,达到“充分发挥围岩的自承能力”和确保隧道长期稳定的目的。人类改造和利用环境是一个自然和自觉的过程。把隧道围岩稳定的基本理念作为指导思想或校核条件(自然规律必须遵循),现代工法(如新奥法、浅埋暗挖法、挪威法、新意法等)和传统工法(如矿山法、太沙基理论、普氏理论等)及适用特殊环境隧道工程的其他力学理论等(自觉与发挥主观能动性应该有效)是以不同的地质条件和结构形式为着眼点解决隧道围岩稳定问题,并遵循实现“基本维持围岩原始状态”的目标,既有独立性,又有统一性的手段或方法。这些手段或方法的变化和发展是随着问题复杂程度的变化而螺旋上升、与时俱进且永无止境的。因此,解决具体隧道围岩稳定问题必须结合具体情况,并根据现存条件加以发展和选用,真正做到具体问题具体分析。该问题的关键就是隧道“经济适用合理工法或技术”要遵循基本理念,根据外部不同环境(地质条件和结构形式)和现存机械、工艺、材料等水平发展和选用合适的手段辅助围岩并与围岩共同发挥最大承载力,实现“基本维持围岩原始状态”,达到“充分发挥围岩的自承能力”的目的,同时符合“正确的理论必须结合具体情况,并根据现存条件加以阐明和发挥,且是发展着的理论”的思想。

由于隧道建设过程中存在地质条件多样性和复杂性,应该用现代力学(如有限元等)分析隧道围岩与支护共同体的基本力学规律,再以传统力学理论分析和结合具体隧道工程实践的适用工法或技术解决隧道围岩与支护共同体的稳定问题。隧道设计理论统一性和适用性、隧道受力独立性、隧道支护平衡稳定性、特殊问题的治理措施、隧道施工合理方法判别原则等问题的研究与实践是有益的探索。实际上,这些设计理论和工法,都是一种手段。在隧道建设实

践中采用什么理论和工法或技术并不是最重要的,重要的是建设过程中要遵循基本理念,并符合隧道工法或技术合理性判别原则。因此,山岭隧道工程建设,需要在勘察、设计和施工过程的各环节做细致的工作。在勘察过程中,应该综合研究确定选址布线的基本条件,包括隧道区域的围岩工程地质、水文地质情况;设计上应合理选择断面形状以适应原岩应力场,同时正确设计支护方法以利于围岩稳定和自承作用;施工过程要合理选择开挖断面大小、形式、顺序,并与支护顺序、时机相匹配,以防止围岩失稳。掌握围岩动态的量测,对防止支护结构和围岩破坏与失稳具有重要意义,但量测资料的分析应用必须与工程地质、设计方案、施工过程有机结合,充分发挥工程师的综合判断能力,而不应过分依赖“精确”的数值计算结果。因此,在遵循现行设计、施工规范的基础上,还必须掌握以上隧道设计、施工新理念,特别是地下水丰富或围岩稳定性差的情况,以确保隧道工程又好又快地建设。

学习实践过程中,本书倡导培养的思维方式为:思想理念、手段方法和观察问题三者有机融合、相互促进,并特别指出手段与问题的变化与发展是螺旋上升、与时俱进且永无止境的。而工程质量要求的提高使问题越来越复杂,从而手段也应该越来越先进。因此,在机械设备、计算机、材料等发展推动土木工程建设时,人们应该遵循自然规律,结合具体工程,研究经济适用的工法或技术。而“生产力与生产关系相适应、经济基础与上层建筑相适应”便于检验手段方法的适应性,说明手段、问题相互协调的重要性,其中手段是在解决问题过程中不断创新、不断提高的。思想理念为:充分发挥围岩的自承能力和基本维持围岩的原始状态。这涵盖了传统工法和现代工法的基本理念。手段方法为:目前工法问题的研究重点是针对具体问题研究适用合理工法,并确保工法是可持续发展的。监控量测可以为修正完善合理工法提供依据,但不包含错误工法或技术。

本书是作者在近20年的工作经验、8项相关课题研究和约200座实体隧道的设计施工验证的基础上,结合已有论文著作成果,提炼总结形成的隧道设计与施工新思路与新方法。在本书出版之际,经相关前辈和学者同意,分别节录了王梦恕院士的著作——《地下工程浅埋暗挖技术通论》;陈礼伟、程崇国等人的“隧道工程讲座”(杭州2007、2009);张松柏、杨峰的“乌鞘岭特长隧道、北天山隧道等工程技术报告”等相关内容。在此对这些文献的作者表示衷心的感谢。

编者
2010年2月

目 录

第 1 章 隧道围岩变形与支护平衡	1
1.1 隧道围岩变形与支护机理	1
1.2 隧道围岩的变形破坏特征和支护对策	1
1.2.1 围岩的变形破坏特征	1
1.2.2 围岩的加固支护对策	3
1.3 隧道围岩的平衡稳定问题	5
1.3.1 平衡概念	5
1.3.2 不稳定平衡工程事故分析	6
1.4 洞室围岩稳定经典历史工程实例	8
第 2 章 隧道围岩稳定基本理念及其应用	12
2.1 隧道围岩稳定的基本理念.....	12
2.2 隧道预支护原理与相关理论及拓展.....	13
2.3 预支护应用分类.....	17
2.3.1 自承能力好的完整围岩.....	17
2.3.2 有一定自承能力的围岩.....	17
2.3.3 自承能力差的破碎围岩或软弱围岩.....	17
2.3.4 特殊环境隧道开挖问题.....	19
2.4 自稳性好围岩的预支护原理应用.....	21
2.4.1 完整硬质围岩.....	21
2.4.2 稳定性一般的 II 和 III 级硬质岩及稳定性较好的 IV 级围岩	22
2.5 浅埋自稳差围岩的预支护原理应用.....	24
2.5.1 浅埋预支护围岩特征曲线研究.....	24
2.5.2 浅埋预支护应用.....	29
2.6 深埋自稳性差的围岩预支护原理应用.....	32
2.6.1 概述.....	32
2.6.2 钢拱架的受力分析和支护形式的确定.....	33
2.7 深埋大变形围岩的预支护原理应用.....	42
2.7.1 大变形隧道支护技术.....	42
2.7.2 大变形支护方案.....	43
2.7.3 乌鞘岭隧道 F7 断层段软弱围岩大变形控制施工技术	43
第 3 章 隧道受力独立性	48

3.1	隧道结构受力独立性概念	48
3.2	连拱隧道结构受力独立性的设计与施工	48
3.2.1	隧道跨度对围岩稳定影响	48
3.2.2	传统结构构造	49
3.2.3	改进结构构造	51
3.2.4	前人的经验与教训	51
3.2.5	优化结构构造	54
3.3	双车道连拱隧道模型合理结构构造试验研究	55
3.3.1	模型结构构造设计	55
3.3.2	连拱隧道传统、改进、优化结构构造模型试验	56
3.4	小净距隧道受力独立性设计与施工	58
3.5	小净距隧道受力独立性研究	59
3.5.1	试验装置	59
3.5.2	模型试验方案	59
3.5.3	试验结果与分析	60
3.5.4	模型试验基本认识	62
第4章	隧道施工合理工法选择	63
4.1	隧道工法合理性判别原则	63
4.2	遵循基本理念	65
4.3	正确运用预支护原理	65
4.4	预防隧道局部破坏引发整体失稳问题	66
4.5	开挖能量最小原理	67
4.6	应用说明	67
4.6.1	几种施工方法的应用	67
4.6.2	具体案例说明	68
4.6.3	小净距隧道的开挖	72
4.6.4	V级围岩施工工法	74
4.6.5	铁路高阳寨隧道发生滑坡	76
4.6.6	二衬开裂有关问题	77
4.6.7	山体稳定与隧道稳定	77
4.6.8	其他专家或工程经验的借鉴	78
第5章	不合理工法导致的灾害问题	83
5.1	某些公路隧道工程实践与认识	83
5.2	某城市地铁或道路隧道塌陷问题	85
5.2.1	工程事故分析	85
5.2.2	防止事故的工程措施	88
5.2.3	同类工程借鉴	90
5.3	某深基坑大面积塌陷问题	96

5.4	对轨道交通和房屋结构安全类比的思考	98
5.5	某隧道整体下沉分析及治理	102
5.5.1	工程概况和地质环境	104
5.5.2	监测及分析	104
5.5.3	整体下沉破坏原因分析	106
5.5.4	处治方案	107
第6章	复杂条件下隧道工法研究	110
6.1	隧道穿越运营公路铁路等设施工法合理性分析	110
6.1.1	工程背景	110
6.1.2	设计方案比选	111
6.1.3	待选施工方案的三维有限元分析	112
6.1.4	各工法评价结果	122
6.2	在坡积体段修建隧道有关问题研究	123
6.2.1	工程概况	123
6.2.2	半明半暗开挖边坡稳定性评价及防护对策	125
6.2.3	暗挖偏压段隧道衬砌结构内力分析	132
6.3	穿越破碎带隧道设计与施工实例	134
6.3.1	隧道工程地质条件	134
6.3.2	小管棚短台阶法设计	135
6.3.3	小管棚短台阶法施工	136
6.3.4	施工中注意事项	136
6.3.5	施工工序及步骤	137
6.4	穿越河流与海底隧道设计与施工实例介绍	138
6.4.1	穿越河流的浏阳河隧道	138
6.4.2	厦门翔安海底隧道	139
6.5	其他有参考意义隧道	142
第7章	隧道围岩稳定与施工安全技术	144
7.1	遵循基本理念与正确运用预支护原理	144
7.2	初期支护施工顺序基本认识	146
7.3	软弱破碎围岩隧道施工与支护顺序	148
7.3.1	隧道施工顺序	148
7.3.2	加强支护与合理安排支护顺序	149
7.4	块体坍塌围岩隧道施工与支护顺序	151
7.5	下导洞适度超前预支护全断面施工方法	152
7.5.1	下导洞适度超前全断面施工方法的依据	152
7.5.2	破碎围岩预支护应注意的问题	153
7.6	用新奥法思想处理塌方	153
7.6.1	塌方分类处理	153

7.6.2 某隧道塌方救援方案工程案例分析	154
7.7 不稳定平衡概念解决隧道洞口施工问题	155
第8章 结构衬砌与防水设计	157
8.1 二衬开裂分析	157
8.1.1 问题的提出	157
8.1.2 二衬开裂原因分析	158
8.1.3 小净距隧道后行洞对先行洞二衬影响	158
8.2 结构防水设计	159
8.2.1 地下水与隧道围岩稳定的关系	159
8.2.2 历史工程结构防水措施的借鉴	160
8.2.3 防水的原则	162
8.2.4 防水系统	164
8.2.5 延水关黄河隧道施工涌水设计	165
8.2.6 新疆北天山隧道涌水与治理	166
第9章 隧道特殊问题	167
9.1 隧道边仰坡问题	167
9.1.1 边坡失稳机理与稳定性影响因素	168
9.1.2 仰边坡失稳导致隧道塌方工程实例	169
9.1.3 工程措施	173
9.2 围岩失稳问题	174
9.2.1 塌方	175
9.2.2 掉块	177
9.3 岩爆问题	178
9.3.1 岩爆预测	178
9.3.2 岩爆的防治措施	179
9.4 涌水和突泥问题	180
9.4.1 隧道涌水发生的条件	180
9.4.2 隧道涌水工程实例	181
9.4.3 隧道突泥灾害的发生条件和影响因素	183
9.4.4 隧道突泥事故工程实例	183
9.5 岩溶问题	184
9.6 5·12汶川地震隧道问题	185
9.6.1 山体地形对称隧道震害较轻	185
9.6.2 边坡环境隧道震害较严重	186
9.6.3 特殊条件的隧道震害特征	189
参考文献	191

第1章 隧道围岩变形与支护平衡

1.1 隧道围岩变形与支护机理

隧道开挖前是处于三维应力状态的,隧道开挖后形成了新的临空面,围岩向洞内移动,应力重新调整,从而形成了二次应力。如果围岩的强度高于二次应力,则围岩是稳定的;如果围岩的强度低于二次应力,则必须进行支护,以保证围岩的稳定。

软弱围岩中开挖隧道,如果不对围岩进行适时支护,围岩就会发生破坏。围岩的破坏一般是从围岩表面开始,逐渐向深部开展,依次形成塑性软化区、塑性强化区和弹性区,见图 1-1。塑性强化区和弹性区是围岩承载的主体,塑性软化区是需要支护的对象。通过对软化区进行支护,一方面可以提高其强度,有利于其自身的稳定;另一方面,软化区围岩再对塑性强化区的围岩实施作用,增大了强化区围压,使强化区围岩的承载力得到提高,减小了围岩表面应力差、变形及破坏。因此,通过支护或加固软化区围岩,可以提高强化区围岩的强度,使围岩的自承能力得以充分发挥,实现深部围岩的稳定,并使其成为主要承载区。

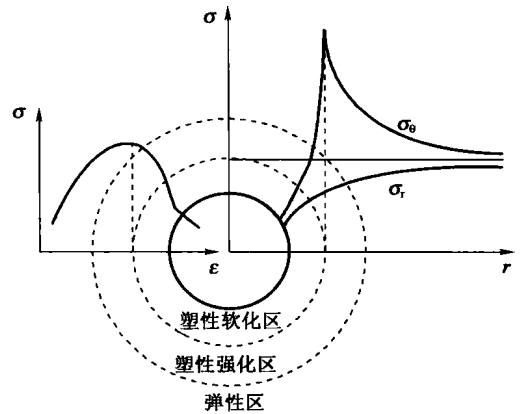


图 1-1 围岩分区与支护特征示意图

除了对浅部(软化区)围岩的加固措施外,在矿山法施工隧道时一般采用光面爆破进行开挖,其目的是减轻爆破对围岩的震动,尽可能保持其原始状态。在稳定性差的围岩中施工隧道时,常采用预支护方法,使破碎围岩在隧道开挖前即得到强化。浅部支护、光面爆破和预支护等措施均是工程施工中常用的技术手段,其目的是在施工时尽可能“基本维持围岩原始状态”,保持围岩强度,从而保证围岩的稳定。

1.2 隧道围岩的变形破坏特征和支护对策

1.2.1 围岩的变形破坏特征

围岩变形破坏的形式和特点主要取决于围岩的岩性和结构。

(1) 坚硬块状岩体

这类岩体本身具有很高的力学强度和抗变形能力,在力学属性上可视为均质、各向同性的连续介质,应力与应变呈线性关系。这类围岩的变形破坏形式主要有:岩爆、脆性开裂及块体

滑移。

岩爆是在高地应力地区,由于开挖导致围岩出现局部高应力集中,使围岩产生突发性破坏的现象。随着岩爆的产生,常伴随有岩块弹射、声响及气浪产生,对地下开挖及建筑物造成危害。

脆性开裂常出现在拉应力集中部位,如洞顶或岩柱中。当天然应力比值系数 $N < 1/3$ 时(水平应力/垂直应力),洞顶常为拉应力集中,在拉应力超过围岩抗拉强度的情况下,常产生拉伸破坏,尤其是当岩体中发育近直立的构造裂隙时,即使拉应力集中较小,也会产生垂向张拉裂缝。这时洞顶岩体很不稳定,在存在近水平裂隙交切的情况下,易形成不稳定块体塌落,从而造成拱顶塌方。

块体滑移是块状岩体中常见的破坏形式之一。这类破坏常以结构面组合交切形成的不稳定块体滑出的形式出现,其破坏规模与形态受结构面的分布、组合形式及其与开挖面相对关系的控制。典型的块体滑移形式如图 1-2 所示。

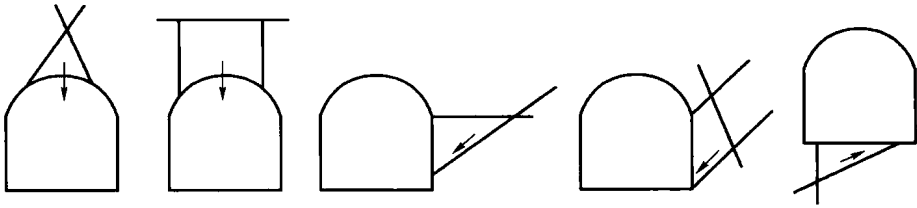


图 1-2 坚硬块状岩体中的块体滑移

(2)层状岩体

这类岩体常以软硬岩层相间的互层形式出现。岩体中的结构面以层理面为主,并有层间错动及泥化夹层等软弱结构面发育。层状岩体的变形破坏主要受岩层产状及岩层组合等因素控制,其破坏形式主要有:沿层面张裂、折断塌落、弯曲内鼓等。不同产状围岩的变形破坏形式如图 1-3 所示。在水平层状围岩中,洞顶岩层可视为两端固定的梁板,在顶板压力作用下,梁

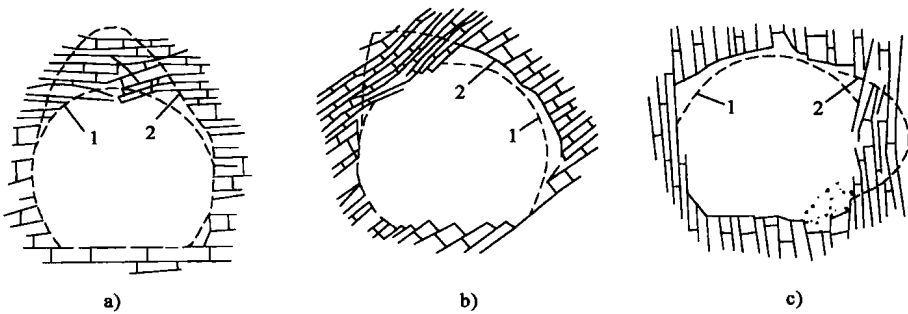


图 1-3 层状围岩变形破坏特征

a)水平层状岩体;b)倾斜层状岩体;c)直立层状岩体

1-设计断面轮廓线;2-破坏区界线

板将产生下沉弯曲、开裂。当岩层较薄时,若不支撑,任其发展,则将逐层折断而塌落,最终形成如图 1-3a)所示的三角形塌落体。在倾斜层状围岩中,常表现为沿倾斜方向一侧岩层弯曲塌落,另一侧边墙岩块滑移等破坏形式,形成不对称的塌落拱[图 1-3b)]。在直立层状围岩中,

当天然应力比值系数 $N < 1/3$ 时,由于洞顶受拉应力作用,使顶板发生沿层面的纵向拉裂,在自重作用下岩柱易被拉断塌落。侧墙则因压力平行于层面,常发生纵向弯折内鼓,进而危及拱顶的安全[图 1-3c)]。

(3) 碎裂岩体

碎裂岩体是指断裂带、岩脉穿插挤压破碎带和风化破碎加次生夹泥的岩体。这类围岩的变形破坏形式常表现为崩塌和滑动(图 1-4)。破坏规模和特征主要取决于岩体的碎裂程度和含泥量的多少。在以岩块刚性接触为主的碎裂围岩中,由于变形时岩块互相挤压、错动,将产生一定的阻力,因而不易产生大规模塌方。相反,当夹泥含量很高时,由于岩块间失去刚性接触,则易产生大的塌方。若不及时支护,将产生大的变形,直至冒顶。

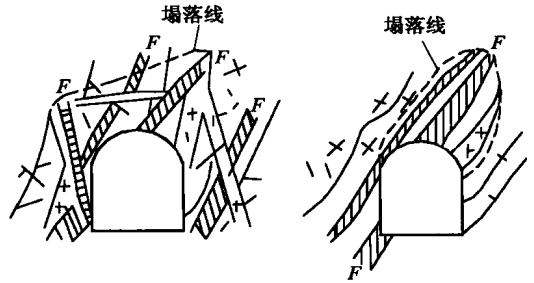


图 1-4 碎裂围岩塌方示意图

(4) 松软岩体

松软岩体是指强烈构造破碎、强烈风化岩体或新近堆积的松散土体。这类围岩的力学属性表现为弹塑性、塑性或流塑性,其变形破坏形式以拱形冒落为主。当围岩结构均匀时,冒落拱的形状较为规则[图 1-5a)],但当围岩结构不均匀或松软岩体仅构成局部危岩时,则常表现为局部塌方、塑性挤入及滑动等变形破坏形式[图 1-5b)、c)、d)]。

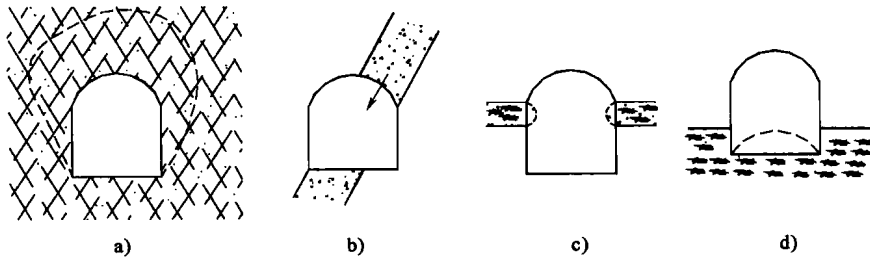


图 1-5 松散围岩变形破坏形式

a) 拱形冒落; b) 局部塌方; c) 侧鼓; d) 底鼓

1.2.2 围岩的加固支护对策

由于地下建筑处于岩体介质中,因此应当把地层视为支护结构的共同承载部分,也就是说,应由支护结构和地层共同组成承载体系。其中,地层的自承力作用是十分重要的,如果没有这种作用,洞室的施工将变得十分困难或无法施工。实际上在岩体中开挖洞室后,出现围岩二次应力状态,同时洞室围岩相应地产生变形和位移。不同的地质条件和工程条件,洞室围岩可能出现两种情况:一是洞室的变形属于弹性变形,在无支护情况下仍能维持稳定;二是洞室的变形属于非弹性变形,由于围岩继续变形而导致破坏,甚至大量的塌落。当围岩可能出现破坏时,就需要支护结构来约束围岩变形的继续扩展,因而支护结构受到围岩变形所产生的压力,即目前一般工程概念中所指的围岩压力。因此,围岩压力是围岩与支护结构的相互作用力,是由于围岩产生变形或破坏所引起的作用在衬砌上的压力。

针对围岩的不同变形破坏方式,围岩对支护结构作用的围岩压力表现方式也各不相同。根据不同围岩变形破坏特征,可将围岩压力的基本类型划分为:松动压力、塑性形变压力、冲击压力和膨胀压力。相应的支护结构设计施工要根据围岩的结构特点和潜在的变形破坏方式而进行。

(1) 松动压力与支护

松动的岩体或者施工爆破所破坏的岩体作用在洞室上的压力称为松动压力。实际上,松动压力就是部分岩体的重力直接作用于支护结构上的压力,所以松动压力本质上应视作松动荷载。因此,洞顶上的压力特别大,而两侧稍小,底部一般不会出现。

产生松动压力的原因有地质因素和施工因素两方面。松动压力在各种地层中都有可能出现,在完整性很差的岩层中开挖洞室,如果不支护可能塌落成拱形而稳定下来,拱形与支护结构之间岩石的重力就是作用于支护结构上的松动压力。在坚硬岩层中,如果层理、节理裂隙切割具有不利的组合,将使部分岩体破裂而形成松动压力。

施工程序对松动压力的发展也有决定性的影响。爆破是引起岩层松动的主要原因,松动区的大小受钻孔布置、炸药种类和装药量的控制。在破碎岩层中,松动压力的大小决定于临时支护的种类。成洞后,及时进行支护,能够约束围岩的变形,则可以控制围岩进一步松动和破坏,从而减少围岩的变形和松动,使围岩松动压力减小。因此,对潜在围岩松动问题,设计与施工方案应以及时支护和防止松动区扩展为重点。

(2) 塑性形变压力

当围岩二次应力状态超过岩体的极限强度时,洞室周围出现塑性区域或破坏区域,产生塑性变形。如果洞室周围的塑性区域扩展不大,随着洞室周边位移的出现,地层塑性区达到稳定平衡状态,围岩没有达到承载能力的极限值;但如果塑性区继续扩展,则必须采取支护措施约束地层变形,方能保持洞室围岩处于稳定状态,这时为了阻止地层变形,就会显现出塑性形变压力。显然如果地层最初处于弹性状态,成洞后的二次应力状态仍然保持弹性状态,那么围岩是稳定的,而且洞内不需要支护结构,围岩压力现象也就不会显现出来。因此,岩体重力和构造应力的作用所引起的围岩二次应力状态,才是产生塑性形变压力的原因。

允许围岩出现一定的塑性区,有利于发挥围岩的自承能力,从而减小支护工程的费用。但如果出现的塑性区过大,则围岩的变形破坏可能由形变压力转化为松动压力,使支护结构承受更大的压力。塑性形变压力不仅出现在洞顶和边墙,还可出现在洞底,具体出现部位主要受初始地应力场和隧道形状控制。因此,塑性形变压力支护设计的要点包括:围岩应力场环境分析和支护时机的把握。

(3) 冲击压力

岩爆是围岩压力中的一种特殊现象,有时称为冲击地压。当岩石内部积聚了很大的弹性应变能,一旦遇到机械的扰动,该弹性应变能会突然猛烈地释放出来,形成岩爆。随着巨大的响声,岩片以极快的速度向洞室内飞散开来,岩片成透镜状或叶片状。因此,岩爆就是岩石被挤压到超过其弹性限度,岩体内积聚的能量突然释放所造成的岩石破坏现象。岩爆的发生常常造成矿井或洞室的破坏,并严重威胁施工人员和设备的安全。

产生岩爆的条件是存在高储能岩体和高围岩应力条件。从储聚弹性应变能的能力看,可将岩体分为弹性岩体、塑性岩体和弹塑性岩体,它们的储能特征见图 1-6。岩爆主要在弹性岩体中产生,有时也可以在弹塑性岩体中产生。

弹性应变能的大小和压应力的二次方成正比,而与弹性模量 E 成反比。一般情况下,在较

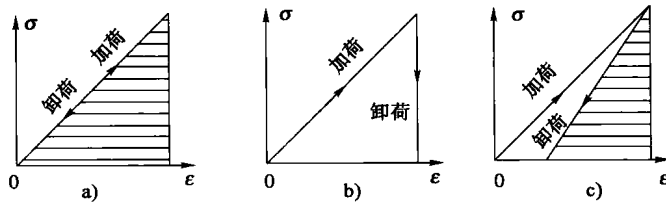


图 1-6 不同岩体类型的储能条件

a)弹性;b)塑性;c)弹塑性

深的地层中,且岩体比较坚硬完整,如花岗岩、片麻岩、闪长岩、辉绿岩、石灰岩、硬煤等,容易发生岩爆现象;在很软弱的岩石中,由于弹性变形能还不太大时便使岩石产生塑性变形,即不能积聚很大的应变能,所以很软弱的岩石中较少发生岩爆现象。大多数岩爆发生在工作面附近。

岩爆会影响施工安全。防治岩爆的方法主要有地应力解除、软化或预裂破坏缓和应力、短进尺多循环分部开挖、超前高压注水、岩面湿化和喷锚、挂钢筋网、采用防护罩装置以及在山体应力集中处进行小规模爆破转移应力等方法。在岩爆较为猛烈时,为防止飞石伤人,可在安全距离躲避一段时间,直到岩爆平静为止。

(4) 膨胀压力

在黏土质页岩或凝灰岩之类的岩石中开挖洞室,无论是在地层的深部还是浅部,洞室围岩往往产生很大的变形,向洞内鼓胀,但不失其整体性,表现为顶板悬垂、两帮突出以及底板隆起,这就是膨胀现象。膨胀现象中最常见的是底鼓。例如,在泥质或煤质页岩中开挖的巷道,经常由于膨胀现象压坏支架,甚至使用各种方式加强的支架也发生破坏现象。由于围岩膨胀而产生的压力就是膨胀压力。

膨胀压力产生的原因主要是岩石本身的物理力学特性和地下水的影响。发生膨胀的岩石,绝大多数是含有黏土质且具有较大塑性的岩土,这种岩石的矿物颗粒一般很细小,呈鳞片状。在矿物颗粒之间满布相互贯连的毛细孔隙,因而具有很大的吸水能力。吸水以后,由于鳞片间毛细管的弯液面作用,使鳞片间距离变化或者位置改变,结果表现为体积膨胀。开挖巷道,由于岩体的原状结构有很大扰动,并且由于自由面的形成,改变了巷道附近地下水的运动规律,在压力差作用下,使地下水更容易向巷道空间渗透和运动。上述因素都增加了地下水的影响,因而巷道围岩就更容易造成膨胀现象。

膨胀压力产生过程往往较长,支护设计应采用先柔后刚,及时施作仰拱形成闭合结构,并做好防排水工作。

1.3 隧道围岩的平衡稳定问题

1.3.1 平衡概念

任何一个力学系统、物理系统以及工程技术中的某些系统,都存在运动(平衡)稳定性的问题:由于工程结构存在各种干扰作用,“不稳定”运动(平衡)是不能长期实现的,如火车脱轨、翻车,桥梁隧道结构破坏(如1994年美国塔科马悬索桥的动力失稳破坏;2007年国内乌竹岭隧

道初期支护后突然坍塌等)。例如,当球体处于图 1-7 状态时,外界给予少许干扰后,球体偏离原始位置且无法自行恢复到原始状态,则处于不稳定平衡状态;反之,当球体处于图 1-8 状态时,外界给予少许干扰后,球体偏离原始位置但能自行恢复原始状态,则处于稳定平衡状态,而在实际问题中“稳定”运动(平衡)是可能长期实现的。

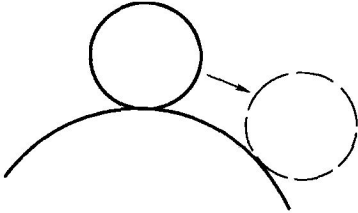


图 1-7 不稳定平衡

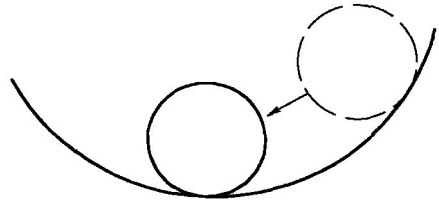


图 1-8 稳定平衡

因此,在工程实践中应充分利用不稳定平衡概念解决隧道、边坡稳定等问题,并对学习和研究中只关注稳定平衡概念而忽视了不稳定平衡概念在工程实践中的应用的的问题进行反思和重新认识。那么,隧道工程实践中如何应用平衡概念呢?如果周围相关环境处于稳定平衡状态,则隧道工程建设就较容易;如果周围相关环境处于不稳定平衡状态,则隧道工程建设就较难,甚至非常难。这时采用避让不稳定平衡体或往里靠延长隧道使之处于稳定平衡状态,否则只能采用工程措施使隧道与周围相关环境共同作用以符合力学规律,特别是施工与支护过程中每个步骤或使用过程中每时段,隧道围岩和支护系统都必须满足三维力学平衡、三维力与变形协调和三维变形协调与稳定。

1.3.2 不稳定平衡工程事故分析

(1)国内某隧道坍塌事故

该隧道右洞为三车道单线隧道(图 1-9),K58+450~K58+490 段实际开挖时地质状况为灰色—灰紫色微风化凝灰岩,块状结构,局部碎裂状结构;有一条小断层,走向与隧道中轴线近平行,宽度为 10~20cm,倾向右边墙,断层带中充填少量泥质,受该断层影响,掌子面上和拱顶网格状节理裂隙发育,密集分布,岩石较破碎。



图 1-9 国内某隧道发生坍塌事故

实际支护情况:K58+442~K58+474 段设计为 II 级围岩,按 II 级围岩施工,无拱架、无仰拱;K58+474~K58+490 段原设计为 II 级围岩,后变更为 III 级围岩,采用 1.2m 间距格栅拱架支护,设有仰拱;K58+490~K58+510 段原设计为 II 级围岩,后变更为 IV 级围岩,采用大管棚超前支护,格栅拱架间距 0.5m,设仰拱。

隧道开挖完成并实施初衬后,隧道围岩的变形稳定,按照有关隧道围岩变形的收敛性判断准则,该隧道是处于稳定状态的。但在经历数月的稳定变形发展过程后,于 2007 年 5 月 4 日上午 5:40,隧道开始塌方,塌方共延续了三天,塌方初步稳定后,通过对塌方段观察,确定塌方范围为 K58+455~K58+490,洞顶的一缓倾节理及右侧一陡倾节理切割该缓倾节理,无明显滴水现象,滑塌范围从洞室左侧拱腰处一直延伸到右侧拱腰处,左侧缓倾节理与右侧陡倾节理相交处滑塌最严重,形成一个三角塌腔,深为 4~8m;塌腔周边和拱顶网格状节理裂隙发育,密集分布,岩石较破碎;通过冒落的岩石来看,岩石成块状,体积较大,节理面有少量泥质。塌方之后陆续有不同程度的掉块、坍塌现象,其中在 2007 年 7 月 8 日掉块较大,塌腔内一凸出的部位全部塌落,最大岩块体积约为 18m³。目前,塌腔最大深度约 10m,洞内塌方体积约 2 400m³。

塌方险情发生后,有关人员共同察看了现场,分析了塌方的原因,确定了临时加固措施,防止塌方进一步扩大。主要措施为:

①加强对塌方段观察,塌腔基本稳定后立即实施应急措施。

②加强监控量测,布点观测 K58+442~K58+458 段围岩变化。

③临时支护施工,K58+442~K58+451.5 段利用现有的格栅拱架作及时支护,间距 0.5m,共 19 榀;K58+451.5~K58+458 段采用 I20 工字钢拱架支护,间距 0.5m,共 12 榀;锚杆采用 5.5m 中空注浆锚杆,梅花形布置,纵横间距 2.0m×2.0m;必要时,拱架底部、顶部采用工字钢或钢管进行临时横向和竖向支撑。

拟订塌方处理方案:

①加强初期支护,改用 20 号工字钢间距 35cm 进行支护,工字钢之间纵向也用 I18 工字钢进行连接,使初期支护形成一个整体。

②加大二衬厚度,根据设计图纸,分别将 K58+442~K58+455 二衬调整为 50cm 厚的钢筋混凝土,K58+455~K58+474 为 80cm 厚的钢筋混凝土,K58+474~K58+490 为 90cm 厚的钢筋混凝土。

(2) 国内某桥发生倾斜事故

事故专家组会议初步认定,三辆货车严重超载且行驶在同一桥跨上是造成该桥倾斜的重要原因。但从工程的角度看,显然这座桥两侧桥面的悬臂太长,桥墩支点的支撑面太小,而且处于弯道,受力极为复杂,属于不稳定平衡情况(图 1-10)。

(3) 国内某隧道二次衬砌开裂和渗漏水

造成隧道二次衬砌开裂和渗漏水现象的实质是隧道较差围岩条件下初期支护较弱(柔性支护),经不起围岩内部调整的干扰,其平衡状态是不稳定的。围岩内部应力调整的荷载增量转移至二次衬砌承担,而二次衬砌强度不足造成了二次衬砌开裂和渗漏水的

现象(图 1-11)。



图 1-10 国内某桥发生倾斜事故

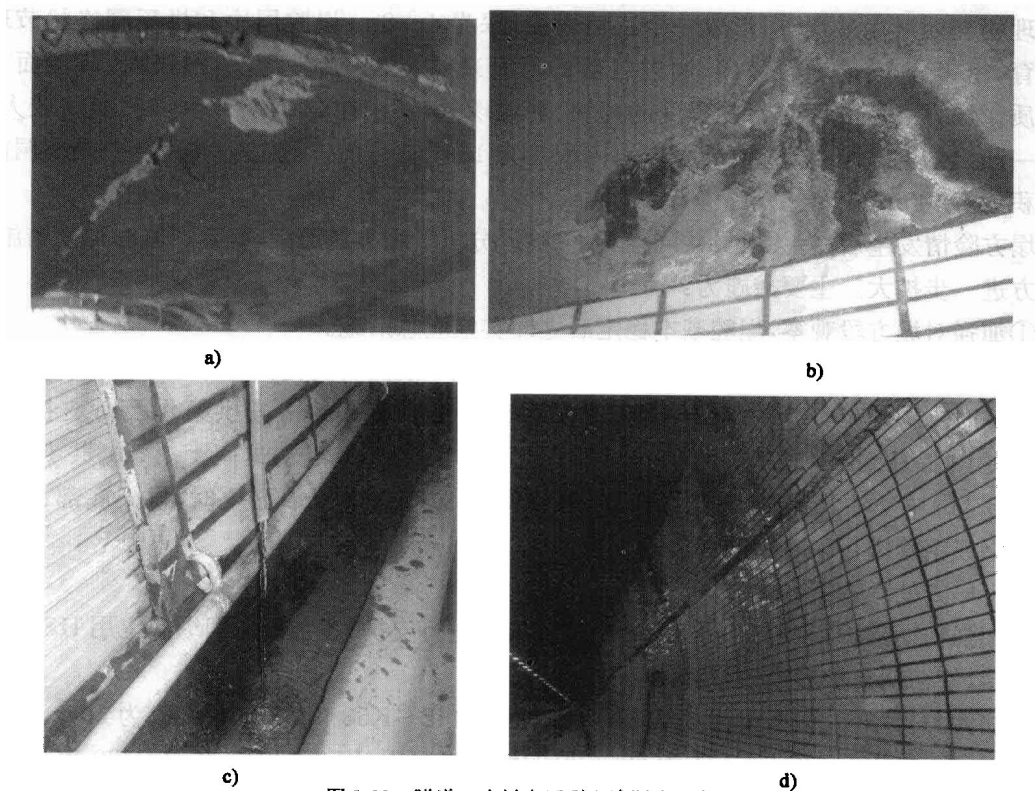


图 1-11 隧道二次衬砌开裂和渗漏水现象

a)、b)二次衬砌开裂;c)、d)隧道渗漏水

1.4 洞室围岩稳定经典历史工程实例

并非隧道开挖就会引起围岩破坏。事实证明,许多已建的地下洞室开挖后,即使没有任何支护也保持了长期的稳定,这充分说明围岩有一定的自承能力。从地道战时开挖的地道、龙游石窟、黄土高原窑洞等大量历史地下工程建设实例(图 1-12~图 1-21)中不难看出,只要选择合适的围岩环境,采取适当的开挖工艺和开挖顺序,选取合适的开挖断面,就能保持地下洞室的安全与稳定。