

深埋特长隧道及其 施工地质灾害

徐则民 黄润秋 著



西南交通大学出版社

前 言

根据国际隧道协会的分类标准,长度大于 10 km 的隧道属于特长隧道。19 世纪末以来,世界各国已经在交通运输、水利水电及城市排水等领域修建了近 200 条特长隧道,其中大多数为山岭隧道。

在山岭重丘区铁路、公路建设中,修建特长隧道是提高线形标准,实现陆路交通高速化、重载化的重要环节之一。随着再次横穿阿尔卑斯山的长达 36 km 和 57 km 的瑞士勒其山隧道和哥特哈德隧道的相继开工,在即将来临的新世纪,修建长度超过 100 km 的超长隧道,甚至“山区地铁”已经不再是梦幻。受到本世纪末通车的长度分别达到 53.85 km 和 50.50 km 的日本青函海底隧道及英—法海底隧道的鼓舞,世界上许多国家都制定了雄心勃勃的海峡隧道工程计划,如 1979 年西班牙和摩洛哥共同批准拟建的连接欧洲和非洲两个大陆,全长 69 km 的直布罗陀海底隧道以及从日本的福冈,通过对马海峡到韩国釜山的长达 250 km 的日韩海底隧道等。水利水电建设中的引水隧洞也在朝着长、大的方向发展,在建的莱索托—南非引水、发电工程中的引水隧洞长达 44.6 km;即将兴建的全长 27.3 km 的印度那斯帕—哈克瑞电站傍山引水隧洞,成洞直径达到 10.15 m。

“多、长、大、深”将是未来特长隧道发展的总趋势。

综观隧道的修建史,制约特长隧道发展的因素包括掘进技术、支护技术、通风技术、不良地质现象等等;但在现有的技术经济条件下,最主要的制约因素则是不良地质,即施工开挖可能诱发的各类地质灾害。前苏联贝阿铁路长 15.30 km 的北穆隧道,最大涌水量高达 $60.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;辛普伦隧道 42 m 大变形洞段的施工耗费了 18 mon;艾那山 I 线 400 m 大变形路段用了 36 mon 才得以通过。阿尔卑斯山地区规划中的深埋特长隧道所面临的主要是高地温问题,而水力资源丰富的印度喜马拉雅地区规划的大量特长水工隧洞所面临的则主要是大变形(挤出)和涌水问题。

因此,地质灾害的超前预报与治理是未来特长隧道勘测及施工中面临的最大障碍。本书即是以上述问题为对象的一部专门性著作,在对特长隧道工程进行概括性介绍的基础上,重点阐述了作者在特长隧道施工中发生频率较高的硬岩岩爆、软岩大变形和高压涌突水方面的研究成果。

全书共分五章,各章在系统总结相关领域既有研究成果的基础上,重点介绍了作者的研究工作及所取得的认识。第一章介绍了特长隧道的概况、发展趋势、结构设计、施工及施工地质灾害的分类与特殊性。此外,还对隧道的埋深分类及 TBM 刀具设计中围岩力学参数的选择问题进行了专门讨论。第二章主要介绍了围岩稳定性评价的弹性静力学方法。第三章,在对硬岩隧道岩爆机理、预测及防治等领域的既有研究进行全面回顾的基础上,系统论述了岩爆过程释放的能量形式、隧道爆破影响岩爆的现实基础、岩石动力学机制等方面的研究进展及以此为依据提出的预防岩爆的工程技术措施。第四章,首先介绍了既有隧道软岩大变形概况及各种治理措施,然后重点论述了描述软岩变形行为的流体动力学方法。第五章以拟建的渝怀铁路圆梁山深埋特长隧道为例,介绍了深埋隧道围岩渗透性预测的水-力耦合分析方法,以及隧道涌水量预测的系统分析方法和镜像法。

本书的主体是第一作者博士后期间主要研究成果的总结。在站工作期间和本书的撰写及出版过程中,始终得到博士后专家指导组组长——黄润秋教授的热情关心与指导,并作为主研人员参与了他主持的国土资源部重点科技项目;初稿完成后,黄教授系统审阅了全文,并增加了部分内容,同时也提出了若干宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢!

感谢张倬元教授、王士天教授两年来在科研工作中所给予的悉心指导,他们广博的学识、丰富的现场工作经验、严谨的治学精神,给予笔者极大的影响。

感谢王兰生教授、聂得新教授、刘汉超教授所给予的关心和帮助。

感谢许模教授、李天斌教授、许强副教授、罗文强博士后、白明洲博士在科研工作中给予的大力帮助。

夏克勤副教授、万新南教授、李晓博士、石豫川副教授在教学工作中提供了诸多帮助,在此深表谢意。

现场工作期间,得到铁道部第二勘测设计院曲科高工、苟定材高工、王科高工的热情帮助,在此表示感谢。

感谢铁道部科学研究院西南分院严金秀副研究员、西南交通大学刘丹副教授在技术资料上给予笔者的帮助。感谢西南交通大学博士后流动站牟瑞芳副研究员提供的学术帮助。

在站期间,得到成都理工学院博士后流动站及工程地质研究所全体老师和同事的多方面关照,在此向他们表示衷心感谢。

目前,地质灾害的超前预报及有效治理仍然是特长隧道勘测设计及施工中面临的世界性难题。由于问题本身的高度复杂性,本书涉及隧道选线、结构设计、隧道施工、工程地质、水文地质、固体静力学、固体动力学及流体动力学等众多学科和领域,受到专业的限制,书中难免存在不足之处,敬请相关专家批评指正。

徐则民
2000年5月

目 录

1 特长隧道及其施工地质灾害导论	1
1.1 隧道及其分类	1
1.1.1 隧道及其既有分类	1
1.1.2 隧道的埋深分类	2
1.2 既有特长隧道概况	9
1.3 特长隧道——未来山岭隧道的发展趋势	11
1.3.1 高速公路与（准）高速铁路——陆路交通的发展趋势	11
1.3.2 高速公路与（准）高速铁路对线形的基本要求	14
1.3.3 特长隧道——提高线形标准的重要途径	15
1.4 特长隧道衬砌结构的多样化与信息化设计	19
1.4.1 特长隧道衬砌结构形式的多样化	20
1.4.2 特长隧道衬砌结构的信息化设计与施工	22
1.5 特长隧道的掘进	23
1.5.1 钻爆法（新奥法）	23
1.5.2 全断面 TBM 法	25
1.5.3 TBM 与钻爆法相结合的掘进技术	36
1.6 特长隧道的施工通风	37
1.6.1 传统通风方式	37
1.6.2 特长隧道的施工通风	38
1.7 特长隧道地质灾害及其特殊性	43
1.7.1 隧道施工地质灾害发生的普遍机制及其分类	43
1.7.2 特长隧道施工地质灾害的特殊性	45
2 二次应力场与隧道围岩稳定性	47
2.1 隧道开挖形成的二次应力场的弹性静力学解	48
2.2 以弹性静力学为基础的隧道围岩稳定性分析	54
2.3 围岩稳定与特长隧道的断面形式	57
3 岩爆机理及其控制	59
3.1 既有研究成果	59
3.1.1 关于岩爆的定义与形成机制	60
3.1.2 岩爆预测	62
3.1.3 岩爆防治措施	66
3.2 岩爆过程所释放的能量形式	67
3.2.1 围岩弹性应变能分析	67
3.2.2 造岩矿物的晶格能	71

3.3 岩爆发生机制的岩石动力学分析	75
3.3.1 岩爆发生机制的岩石静力学分析	75
3.3.2 深井及超深井的井壁稳定问题	80
3.3.3 开挖爆破对岩爆的贡献	83
3.4 岩爆应力波与岩爆追踪现象	111
3.4.1 岩爆追踪的机制分析	112
3.4.2 岩爆追踪过程中岩爆释放能量的衰减	114
3.5 地应力量级与岩爆的关系	116
3.5.1 地应力与岩爆的关系	116
3.5.2 特长隧道浅埋段及傍山隧道岩爆	117
3.6 施工阶段的岩爆控制	127
3.6.1 降低爆破荷载峰值压力、加快爆破荷载衰减	128
3.6.2 拦截爆破应力波	128
4 软岩大变形的机制分析及预测评价	131
4.1 软岩隧道大变形及其既有研究成果	131
4.1.1 软岩大变形概况	131
4.1.2 软岩隧道大变形机理及预测研究现状	137
4.1.3 软岩大变形隧道的支护	148
4.2 固体静力学对软岩大变形的描述及其局限性	157
4.2.1 开挖轮廓线以外软岩的渐进屈服与剪胀	157
4.2.2 开挖轮廓线以内软岩的低次(小尺度)屈服与剪胀	159
4.2.3 固体静力学理论在大变形研究方面的局限性	160
4.3 描述深埋隧道软岩大变形的流体动力学方法	162
4.3.1 基本假设	163
4.3.2 描述软岩流动的参数系统	163
4.3.3 描述软岩传输的基本定律	167
4.3.4 描述软岩大变形的流体动力学模型	168
4.3.5 软岩向深埋隧道的流动	173
5 隧道涌水预测	177
5.1 概 论	177
5.2 渝怀线圆梁山特长隧道的地质与水文地质背景	178
5.2.1 地层、构造与岩溶	179
5.2.2 岩溶水	182
5.3 岩溶水的化学及同位素地球化学特征	183
5.4 岩溶水的系统性分析	186
5.4.1 浅部岩溶水系统	188
5.4.2 浅部各岩溶水系统对隧道涌水的贡献评估	194
5.4.3 深部岩溶水系统	197

5.5 隧道围岩渗透性预测	198
5.5.1 既有研究成果	198
5.5.2 圆梁山隧道毛坝向斜段围岩渗透性预测	201
5.6 隧道涌水预测	206
5.6.1 系统分析方法	207
5.6.2 深埋隧道涌水量计算的镜像法	208
5.6.3 钻孔—隧道比拟法	210
参考文献	212

1 特长隧道及其施工地质灾害导论

1.1 隧道及其分类

1.1.1 隧道及其既有分类

作为地下工程的形式之一,最初的隧道专指可以作为交通孔道的地下空间,后来,为了输水、送电、灌溉及采矿等目的而开挖的线状地下空间也被纳入了隧道的范畴。

据记载,世界上第一条隧道是公元前 2200 年,巴比伦国王为连接宫殿和神殿而修建的一条长 190 m 的地下通道,该隧道是由奴隶们在极其危险的作业条件下完成的。此后的 2000 多年里,隧道修建技术的进展一直不大。直到测量技术取得重大进展并能从两端洞口同时开挖,特别是利用棚架支护和卷扬提升方法后,隧道技术才迈上了一个台阶,开挖了一些军用隧道和土工隧道。然而岩石开挖仍然没有超出“火烧开挖面,烧热后迅速泼冷水使岩石开裂”的掘进方法。公元 14 世纪以来,随着火药的发明,特别是 19 世纪的产业革命,带来了近代隧道开挖技术的新曙光。世界范围内的大规模隧道建设是从 19 世纪中后期开始的。截至 1990 年,仅隧道技术比较发达的意大利、挪威、奥地利、法国、瑞士等欧洲国家,就已建成交通(铁路、公路、地铁)隧道 6 890 km。预计到 2000 年,欧洲交通网中,隧道长度将超过 10 000 km(严金秀, 1999)。

我国最早的隧道可以追溯到几千年前,我国是世界上采矿业发展最早的国家,公元前 1271~1368 年就有深达数百米的盐井。第一条铁路隧道出现于台湾,是一条由基隆到台南的长度仅 261 m 的窄轨隧道;大陆的第一条铁路隧道是詹天佑于 1907 年在京包线上修建的八达岭隧道。解放前,我国共修建隧道 238 座,总长 89 km。

解放后,我国铁路隧道的数量和修建技术有了突飞猛进的发展。宝成线上 2.363 km 的秦岭隧道;川黔线上长 4.27 km 的凉风垭隧道;成昆线上长达 6.379 km 的沙马拉达隧道;京广线上长达 14.3 km 的大瑶山隧道;长 12.8 km 的朔黄铁路长梁山隧道及长达 18.4 km 的西康线秦岭隧道是我国铁路隧道建设史上一个又一个里程碑。根据 1998 年隧道技术状态检查统计^[29, 72],全路运营隧道已达 5 200 余座,共计 2 457.869 km,其中短隧道 3 568 座,占隧道总数的 73%;中长隧道 1269 座,占 29.2%;长隧道 76 座,占 1.5%;特长隧道仅大瑶山 1 座。

截至 1998,公路系统已有 350 多座隧道投入运营,总长超过 100 km。由于汽车的机动性和爬坡能力优于火车,因此,总体上说公路隧道的绝对长度一般较小,但受到建筑限界的影响,其断面面积要比铁路隧道大得多。最近建成的北京—八达岭高速公路潭峪沟隧道全长 3.456 km,由两座平行的主洞和一个服务隧道构成。主洞净高 7.3 m、净宽 13.1 m,比铁路

三线隧道还宽 1.8 m, 居亚洲大断面隧道之首, 在 3 km 以上的公路隧道中, 位居世界第五。而在建的渝长高速公路铁山坪隧道则为三车道, 净宽达 12.96 m, 开挖宽度在 20 m 以上, 开挖断面达到 120 m²; 雅攀线上的中短隧道拟将采用四车道, 开挖宽度将在 20 m 以上, 开挖断面在 200 m² 以上, 目前正处在设计研究阶段。

中梁山 (3.1 km)、缙云山 (2.5 km)、黄草山 (2.6 km)、二郎山 (4.16 km) 及华莹山 (4.7 km) 等隧道的相继建成和开工标志着我国大断面交通隧道的修建技术正日趋成熟。

从 1863 年伦敦建成第一条地铁至今, 世界上已经有 35 个国家和地区的 80 多个城市修建了约 5 000 km 地铁。地铁造价过高一直是制约其发展的主要因素。上海地铁 1 号线长 16.1 km, 造价 100 多亿人民币; 广州地铁 1 号线长 18 km, 每公里造价 7 亿多人民币。目前, 全国 32 个百万人口以上城市中, 有 21 个正拟筹建 33 条总长 649 km 的地铁^[28]。截至 1998 年, 大陆北京、天津、上海、广州已经建成地铁 81.6 km^[27]。

除了交通之外, 修建隧道最多的当属水利水电行业。水工隧道的最大特点是断面一般较小, 但长度大。据不完全统计, 国外已经建成的长度在 10 km 以上的水工隧道就有百余条^[10]; 正在建设的莱索托-南非引水发电工程的输水隧道长达 44.6 km (直径 5.0 m), 目前正利用三台开敞式硬岩 TBM 掘进。我国也已经建成或在建一批特长水工隧道, 如天生桥电站引水隧洞及山西引黄工程南干线 7 号水工隧道等。

“多、长、大、深”, 即数量多、长度大、大断面、大埋深, 将是 21 世纪隧道工程的发展趋势。

由于隧道用途、修建环境及分类目的不同, 隧道分类方案很多, 较为明确的有以下几种:

按用途分为: 交通隧道 (包括铁路隧道、公路隧道、水底隧道、地下铁道、航运隧道、人行地道)、水工隧道、市政隧道 (给水隧道、污水隧道、管路隧道、人防隧道等)、矿山隧道。

按长度分为: 特长隧道 (10 km 以上)、长隧道 (3~10 km)、中短隧道 (小于 3 km)。我国的公路隧道设计规范考虑到既有公路隧道的实际长度, 确定的公路隧道长度分类方案为: 特长隧道 (3 km 以上)、长隧道 (1~3 km)、中短隧道 (小于 1 km)。

按开挖断面大小分为: 特大断面隧道 (100 m² 以上)、大断面隧道 (50~100 m²)、中等断面隧道 (10~50 m²)、小断面隧道 (3~10 m²) 和极小断面隧道 (3 m² 以下)。

按孔数和线路数目分为: 单孔单线隧道、单孔双线隧道和双孔单线隧道。

按围岩特征分为: 岩石隧道和土质隧道。

按所处地理位置分为: 山岭隧道、城市隧道和水底隧道。

按断面形式分为: 圆形隧道、拱形隧道及矩形隧道等。

1.1.2 隧道的埋深分类

将隧道按埋深进行分类和其他分类方案有一个很大的不同, 由于同一座隧道不同地段的埋深可能差别很大, 特别是对于长度较大的山岭隧道, 同一隧道不同洞段的分类结果可能是不同的。

我国经典的隧道工程著作^{[2]-[6]}根据埋深将隧道划分为深埋隧道和浅埋隧道两大类; 现行的铁路隧道设计规范^[74]和公路隧道设计规范在计算围岩压力时, 也都采用该划分方案。

深埋隧道和浅埋隧道的临界深度是以隧道顶部盖层能否形成压力拱（自然拱）为原则确定的，因此，不同类别围岩的分界深度是不一样的，一般采用塌方平均高度^[74]（表 1.1）的 2~2.5 倍。

表 1.1 各类围岩塌方高度平均值

围岩类别	VI	V	IV	III	II	I
h_v (m)	0.6	1.2	2.3	4.7	10.0	19.0

根据上述方案，对于山岭隧道，埋深超过 50 m（保守的估计是 100 m）的隧道基本上都可以划分为深埋隧道。

我国在 80 年代以前就已经建成最大埋深达 1 650 m 的成昆线关村坝隧道；80 年代以后，修建的隧道越来越多，长度也越来越大。山岭隧道长度的增大，必然引起埋深增大，埋深数百米的隧道已很常见，最大埋深超过千米的隧道也越来越多（目前世界上隧道的最大埋深已经接近 3 000 m），如锦屏电站引水隧洞最大埋深 2 500 m、西康线秦岭隧道最大埋深 1 600 m。隧道埋深增大同时，也出现了与此有关的岩爆、软岩大变形、高地温、高压涌水等与隧道论证、设计及施工等密切相关的问题。尽管这些问题（如岩爆）在埋深几十米的隧道中也有发生，但主要还是出现在埋深大于数百米的洞段，而且具有埋深越大，发生几率越高的趋势。

因此，将埋深数十米和数百米甚至上千米的隧道同归于深埋隧道，是欠合理的。近年来，“深埋隧道”一词被广泛采用^{[23]~[25]}，而且似乎已经被赋予了新的含义，但其临界深度并未被明确；文献[22]指出“隧道埋深大于 500 m，可称为深埋隧道”，但这与现行划分方案有冲突。

因此，从某种意义上来说，以往的深、浅埋隧道划分方案线条过粗，对隧道，特别是长大隧道的设计、施工缺乏更明确的指导意义，有必要考虑更详细的划分方案。

1.1.2.1 山体初始地应力状态及隧道轴线方向选择

将隧道按埋深进行分类的结果是对数字的划分，但其根本目的却在于为围岩稳定性、涌水及高温热害等不良地质现象的预测预报研究奠定基础，并为隧道的结构设计和施工提供依据。在需要考虑的众多不良地质现象中，以围岩稳定性最为重要，而岩体初始应力状态是与其密切相关的重要问题之一。

尽管关于地壳深部应力状态的研究已经有很长的历史，也积累了比较多的资料，但是真正能为山岭隧道设计所利用的并不多。第一，以往的相关研究主要是为地震、地热、采矿、石油及水电工程等目的而进行的，从海拔来说，一般都是以标高不大的河谷、沉积盆地、古老结晶岩地盾等部位为零点向深部进行的（图 1.1），很少是在高山上进行的；第二，对于长隧道和特长山岭隧道，从隧底到山顶的垂直高度（埋深）一般都在数百米以上，许多已达千米以上（Gotthard

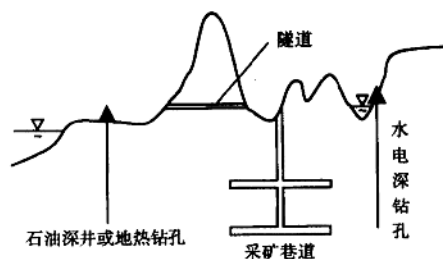


图 1.1 传统地应力研究的深度范围

隧道已经达到 2 500 m)，隧道设计所要了解的是从山顶到隧道轴线下方一定范围内的初始地应力分布。因此，一般不能完全依靠传统的地应力资料来推断高耸山体内地应力初始状态的垂向变化。

总的说来，延长较远的线状山脉一般都是大地构造学所称的挤压褶皱带，它们形成的真三轴应力状态一般为 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ，其中最大主压应力垂直于山脉走向，中间主应力与山脉走向一致，最小主应力为铅直方向。如秦岭山脉近东西向延伸，现今测得的最大主应力方向为 $N10^\circ W$ ；拟建的渝怀线将要穿越的圆梁山山脉总体走向为 $N20^\circ \sim 30^\circ E$ ，现今测得的最大主应力方向为 $N52^\circ \sim 61^\circ W$ 。

地应力场是构造应力场与自重应力场叠加的产物，而山脉又是地壳上应力集中最为强烈的区域之一，因此，山岭隧道围岩的初始地应力分析应该综合考虑构造应力场和自重应力场。山脉在褶皱隆起以后，经历的最大变化就是侧向卸荷和风化剥蚀作用，这种作用一般是从表面向山体内部缓慢进行的；进行的程度与山体的隆升高度和山体的宽度有关，高耸的单薄分水岭进行得快，而宽厚山体则进行得慢。上述过程的结果是使岩体内积蓄的构造应力得以释放，山体表面一定范围内的应力场由以构造为主转化为以自重应力为主。

在以自重应力场为主的部分，最大水平主应力 ($\sigma_{H \max}$)、最小水平主应力 ($\sigma_{H \min}$) 和垂直主应力 (σ_v) 三个应力分量一般具有 $\sigma_{H \max} > \sigma_v > \sigma_{H \min}$ 或 $\sigma_v > \sigma_{H \max} > \sigma_{H \min}$ 的关系；在山体内部，特别是局部侵蚀基准面附近及其以下，仍以构造应力为主， $\sigma_{H \max} > \sigma_{H \min} \geq \sigma_v$ 。

山岭隧道，特别是长隧道、特长隧道，的轴线基本上都是与山体走向垂直或近于垂直的，如西康线秦岭隧道及拟建的渝怀线圆梁山隧道等，本书对隧道埋深的划分即以隧道轴线（大致）垂直山脉走向为前提进行的。尽管有些学者提出隧道轴线应与最大主应力方向有一定夹角，但总体上看，尽量使两者平行是合理的。

第一，可以使隧道长度达到最小；
第二，有利于围岩稳定。一般说来，作用于隧道洞壁上的切向应力越小，越有利于围岩稳定。隧道轴线垂直山体走向（图 1.2），也就相当于与 $\sigma_{H \max}$ 平行或小角度相交，这将会避免 $\sigma_{H \max}$ 分解为切向应力或降低它对切向应力的贡献。川藏线二郎山隧道较为强烈的边墙片帮及岩爆可能就与隧道轴线与 $\sigma_{H \max}$ 交角较大 ($23^\circ \sim 46^\circ$) [55] 有关；第三，可以简化计算。

当受到地形、线路总体展部及山体经历构造运动的复杂性的影响，而无法保证隧道轴线与 $\sigma_{H \max}$ 平行，而且交角较大时（图 1.2），必须对由于 $\sigma_{H \max}$ 分解出的垂直隧道轴线方向的分力可能引起的隧道，特别是软岩隧道的围岩稳定性问题给予高度重视。

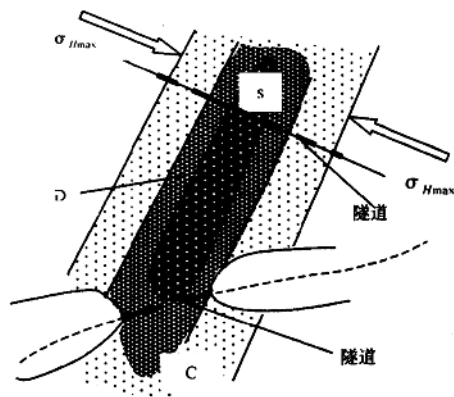


图 1.2 隧道轴线与最大水平主应力方向的关系

金川镍矿二矿区 1250 m 水平巷道轴线方向与最大主应力方向夹角接近 60° ，最大主应力为 30 MPa。隧道在经过片麻岩和石墨绿泥片岩地段时，片帮冒顶频繁，顶部塌方高度达到 7~8 m，施工极为困难。基于上述情况，在修建 1200 m 水平巷道时，在片麻岩和石墨绿泥片岩地段，将巷道方向调整到接近最大主应力方向，施工比较顺利地通过了该洞段^[6]。

1.1.2.2 划分方案

在尊重既有划分方案的基础上，从岩体初始地应力特征、围岩压力及围岩稳定性的角度，根据埋深将隧道划分为浅埋隧道、深埋隧道和超深隧道三大类（表 1.2）。

表 1.2 硬岩隧道埋深划分方案

隧道分类	浅埋隧道	深埋隧道	超深隧道
深度范围	$\leq (2 \sim 2.5) h_0$	$(2 \sim 2.5) h_0 \sim 500 \text{ m}$	$\geq 500 \text{ m}$

1.1.2.2.1 浅埋隧道

围岩为地表以下一定深度范围内由原岩风化形成的坡积层或强风化壳，主要是 I、II 类围岩和部分裂隙发育、结构面风化强烈的节理化岩体构成的 III 类围岩。

初始地应力场为自重应力场， σ_v 、 $\sigma_{H \max}$ 及 $\sigma_{H \min}$ 具有如下关系： $\sigma_v \geq \sigma_{H \max} \approx \sigma_{H \min}$ 。围岩对开挖过程的反应方式是坍塌、冒顶，地表出现线状塌陷。围岩压力计算与结构设计可以采用应力传递原则或太沙基理论，结构主要承受上覆围岩自重。围岩自承能力差或无自承能力。

浅埋隧道与深埋隧道的临界深度仍然采用既有方案，即 $(2 \sim 2.5) h_0$ 。这主要基于两点考虑：（1）长期以来，我国的教材、规范一直采用该方案，而且涉及围岩压力计算、衬砌结构及施工方案设计等众多问题，不宜进行大的改动；（2）埋深几十米的浅埋隧道和能够形成然拱的深埋隧道之间，在围岩破坏形式、支护方式（support type）等方面的确有很大不同。如有些埋深 50~100 m 的隧道（洞段）不仅围岩能够自承，而且岩爆强烈，将其划分为浅埋隧道是不合适的。

尽管浅埋隧道与深埋隧道的临界深度是随围岩类别的变化而变化的，但是它们的区别是明显的。

1.1.2.2.2 深埋隧道

（1）围岩基本上属于山体卸荷范围内的弱风化岩体或新鲜岩体，初始应力场由自重应力场和构造应力场叠加而成。

（2） $\sigma_{H \max}$ 与隧道轴线基本平行或小角度相交， σ_v 、 $\sigma_{H \min}$ 与隧道轴线垂直，三者一般具有下关系： $\sigma_{H \max} > \sigma_v > \sigma_{H \min}$ ，见图 1.3、1.4、1.5、1.6、1.7 所示。图中原始数据均引自文献[55]。

（3）随着埋深增大， $\sigma_v/\sigma_{H \min}$ 减小，并趋于 1。

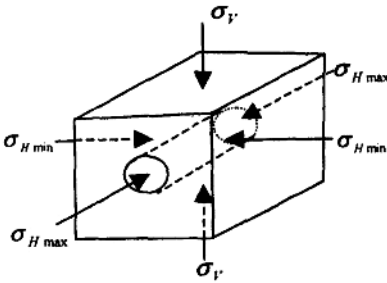


图 1.3 深埋隧道周围的非均布初始应力场

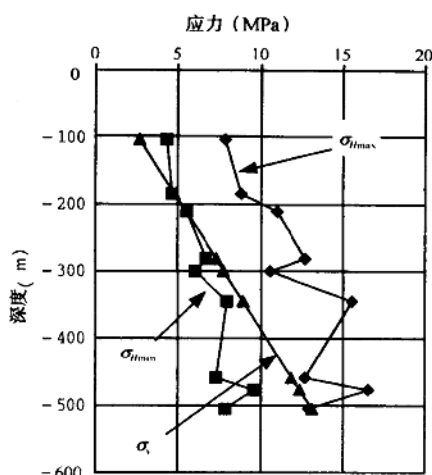


图 1.4 秦岭隧道秦钻 5 孔地应力—深度曲线

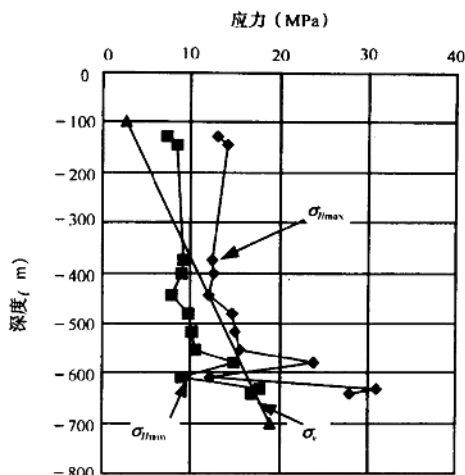


图 1.5 二郎山隧道 CZK2 孔地应力—深度曲线

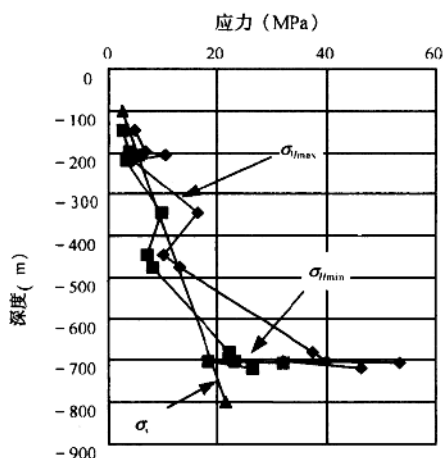


图 1.6 二郎山隧道 CZK3 孔地应力—深度曲线

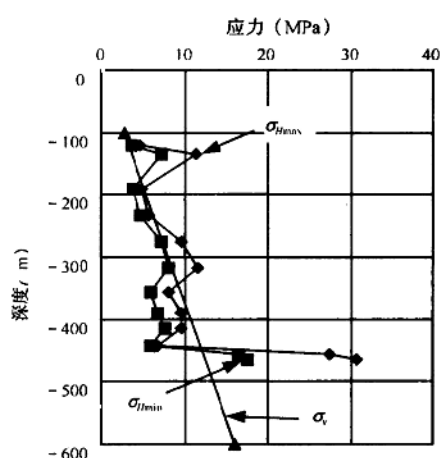


图 1.7 二郎山隧道 CZK4 孔地应力—深度曲线

(4) 围岩对开挖卸荷过程的反应：硬岩主要表现为岩爆和片帮，当开挖断面比较大，节理比较发育时，可能存在较大岩块的塌落；软岩则表现为挤出，如果支护不及时或支护不合理，可能会由于围岩的渐进屈服和多序次屈服，引起所谓的“软岩大变形”。

岩爆与片帮都是开挖引起隧道周围一定范围内的应力重分布，并在其它因素影响下发生的围岩失稳现象，只是具体表现形式不同而已，前者主要表现为岩块（片）的爆裂弹射和抛掷，后者主要表现为平行开挖轮廓面方向的片状剥落。很多情况下，岩爆和片帮是难于截然分开的。

深埋隧道岩爆与片帮发生部位与隧道埋深和 σ_v/σ_{Hmin} 大小有关。当隧道绝对埋深较小，特别是埋深小于 200 m、 σ_v/σ_{Hmin} 较大，拱顶出现拉应力区时，岩爆与片剥主要发生在拱顶

或拱肩；随着埋深增大和 $\sigma_v/\sigma_{H\min}$ 的减小，边墙开始出现，并逐渐波及到边墙底部；个别情况下，隧底也会出现岩爆和片帮（表 1.3、表 1.4）。

表 1.3 秦岭隧道Ⅱ线进口端岩爆、片帮发生部位与埋深的关系

（据刘正雄等资料整理，1998）

桩号	埋深(m)	发生部位	岩爆与片帮描述
DYK64+505~530	60	右拱部	明显岩爆：发出“啪…、…啪…”的岩石爆裂声音，片状岩块大量坠落
DYK64+807~827	100	右拱部	严重岩爆：发出“啪…、…啪…”，岩片爆落、弹射达4m
DYK65+150~200	70	拱部	严重岩爆：声音大，发出“啪…、…啪…”“嘭…、…嘭…”；爆落量大、最大一次达到10m ³ ；岩片面积大，最大的达到1m ² ，厚0.15m
DYK65+705~715	220	齐头拱部	较严重岩爆：弹射、剥落和掉块
DYK65+870~880	300	拱顶	剥落、掉块现象严重
DYK66+150~315	550	拱顶	轻微岩爆
DYK67+467~478	350	拱部	轻微岩爆
DYK67+671~717	400	拱部	轻微岩爆
DYK68+018~028	440	拱顶	拱部剥落、掉块严重
DYK68+860~870	200	拱部	轻微岩爆
DYK69+120~146	150	拱顶	严重岩爆：拱部剥落、掉块严重
DYK69+264~280	150	拱顶	严重岩爆：拱部剥落、掉块严重
DYK69+810~830	410	拱顶	轻微岩爆
DYK71+560~652	760~820	拱顶	剥落、弹射、掉块；为地形由缓变陡处（ σ_v 较大）
DYK72+060~420	770~900	左拱、两侧边墙及右墙脚	围岩大面积剥落，掉块，右墙剥离现象严重
DYK72+420~460	900	拱部及两侧边墙	整个开挖断面严重剥落，剥落石方超过100m ³
DYK72+460~510	920	左拱	轻微岩爆
DYK72+510~550	940	齐头拱部	剥落、弹射、掉块严重
DYK72+560~660	960~1060	左拱、右边墙	轻微岩爆
DYK73+020~090	1000	左拱、左边墙	轻微岩爆

表 1.4 天生桥二级水电站Ⅰ号引水隧洞岩爆位置及埋深^[22]

桩号	埋深(m)	发生部位	岩爆面积(m ²)	深度
K1+730~996	505~490	拱顶右侧	265×3.5	1~2
K5+170~180	430	右边墙中部	10×2	0.1
K5+184~195	430	拱顶左侧、左边墙上部	11×1.5	0.1
K5+195~209	430	右边墙上部	14×6	0.2~0.3
K5+555~569	600	拱顶左侧、左边墙上部	14×1.5	
K5+619~632	580	拱顶右侧、右边墙上部	13×1.5	0.3~0.5
K5+640~660	565	拱顶	20×2	0.1~0.3
K6+204~228	460	拱顶右侧	11×4	

续表 1.4 天生桥二级水电站 I 号引水隧洞岩爆位置及埋深^[22]

桩 号	埋深 (m)	发 生 部 位	岩爆面积 (m ²)	深 度
K6+580~614	515~555	拱顶及左边墙上部	28 × 5	0.1
K6+624~652	500	隧底左侧、左边墙下部	40 × 3.5	0.05~0.5
K6+658~683	500	隧底左侧、左边墙下部	25 × 0.8	
K6+714~842	410~455	拱顶、两侧边墙、隧底左侧	128 × 2	0.05~0.2
K6+862~884	385	拱顶右侧、右边墙上部	22 × 2.5	0.1~0.15
K7+868~910	120~115	拱 顶	44 × 5.5	0.5~2.5
K7+910~928	110~115	拱 顶	18 × 4	0.5~1
K7+930~944	100	拱 顶	14 × 5	0.5
K7+936~948	100	拱 顶	12 × 5	0.5

(5) 围岩压力计算: 对于大多数新鲜围岩, 应该采用基于弹塑性理论的 Fenner 公式或 Caquot-Kerisel 公式; 对于节理化强烈, 且风化严重的围岩, 可以采用普氏塌落拱理论或太沙基理论计算。

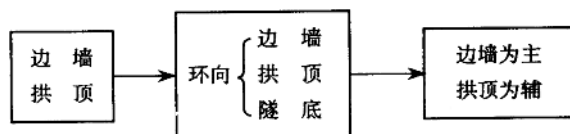
1.1.2.2.3 超深隧道

(1) 围岩主要是各类未风化的新鲜岩石。

(2) $\sigma_{H \max}$ 与隧道轴线基本平行或小角度相交, σ_v 、 $\sigma_{H \min}$ 与隧道轴线垂直, 三者一般具有下关系: $\sigma_{H \max} > \sigma_v$; $\sigma_v / \sigma_{H \min} \approx 1$ 或 $\sigma_{H \min} / \sigma_v > 1$ (图 1.5、1.6、1.7)。

(3) 随着埋深增大, $\sigma_{H \min} / \sigma_v$ 增大。

(4) 主要的围岩稳定性问题依然是岩爆、片帮及软岩大变形, 块体稳定性问题将有所减少。岩爆及片帮在 (圆形) 隧道横断面上的发生部位随深度增加, 一般应具有以下变化规律:



秦岭隧道和天生桥电站引水隧洞在埋深大于 500 m 的洞段, 边墙与拱顶发生岩爆的几率相近。二郎山隧道边墙与拱顶同时发生较严重的片帮, 该隧道斜穿由志留系、泥盆系砂岩、泥岩及白云岩等构成的一个单斜山; 隧道长 4.161 km, 最大埋深 760 m。施工期间在山体中部近 2 km 的路段发生了以松脱剥离为主的片帮。主要片帮地段埋深 500~760 m, 片帮在两侧边墙及拱顶出现的几率基本相同^[35], 甚至边墙要比拱顶还普遍些。

环向岩爆与片帮的典型例子是天生桥引水隧洞 (表 1.4)。需要指出的是, 对于松弛、脱落等片帮现象, 相对于边墙和拱顶, 隧底即使发生也不易于被发现, 特别是岩块较小时。因此, 环向 (隧底) 围岩破坏的实际发生情况应该比文献报道的要多些。

(5) 围岩压力计算应该采用基于围岩弹塑性变形的塑性松动圈理论。

1.1.2.2.4 小 结

随着特长山岭隧道的日益增多, 隧道的绝对埋深越来越大, 与隧道的埋深有关的问题也越来越多, 因此, 完善既有的粗线条隧道埋深划分方案是必要的。

大型山脉初始应力状态的架构基本类似, 即 $\sigma_{H \max}$ 、 $\sigma_{H \min}$ 分别与山脉走向垂直和平行; 山脉由于隆起卸荷等自然过程, 其地应力状态在垂直方向具有一定的变化, 对隧道影响最大的应该是 $\sigma_{H \min}$ 与 σ_v 的比值。

根据围岩初始应力状态、围岩变形破坏方式, 山岭隧道可以划分为浅埋隧道、深埋隧道和超深隧道三大类, 它们的分解深度分别为 $(2 \sim 2.5) h_q$ 和 500 m。

应该说, 隧道的埋深划分是一个与设计、施工密切相关的复杂问题, 本书仅仅提出了对这个问题的一些初步设想, 在分类中是否应该更详尽地考虑岩石类型、结构面影响、地温等, 还有待进一步的深入研究。

1.2 既有特长隧道概况

从交通工程的角度来看, 人们最初设计隧道的目的在于克服线路上通过展线难以逾越的山岭(越岭隧道)、沿溪(河)的高陡斜坡(傍山隧道)及大的水体(水底隧道)等。受到技术条件及财力的影响, 在工程设计时, 总是尽量避免采用隧道, 无法避免时, 则设计一些短隧道或隧道群, 力求降低工程造价。但是, 长隧道一直是人们积极寻求的, 因为长隧道不仅可以有效缩短线路里程(隧道内一般采用直线或大半径曲线), 而且可以极大地改善线路的运营条件, 提高交通工具的运行速度。随着科学技术的进步和财富的不断积累, 不仅交通隧道的长度不断增大, 而且原来仅存在于幻想之中的为其他目的服务的长隧道及特长隧道, 如为跨流域调水而修建的长度超过 100 km 的水工隧道等, 也相继建成。

在已经投入使用的各类特长隧道中, 水工特长隧道最多。已有 100 余条^[10], 部分大于 10 km 的水工隧道列于表 1.5 中。穿越阿尔卑斯山的长 13.675 km 的仙尼斯峰隧道, 由意大利、法国从 1857 年开始共同修建, 1871 年通车, 是世界上第一座铁路特长隧道。此后的 130 多年中, 世界上 15 个国家共修建了 40 余条特长铁路隧道, 总长度超过 600 km, 其中 91% 属于越岭隧道, 部分长度大于 13 km 的特长铁路隧道被列于表 1.5。由于汽车的爬破能力和灵活性远大于火车, 公路特长隧道的数量少于铁路隧道。

表 1.5 各国修建的部分特长隧道

使用分类	隧道名称	所在国家	长度(km)	最大埋深(m)	断面面积(m ²)	施工方法	竣工年代	文献
水工隧道	赫尔辛基	芬兰	120.0		17.6	钻爆		[10]
	佩扬奈	芬兰	120.0		15.5	钻爆		
	马赫斯	秘鲁	95.0			钻爆		
	奥伦治菲什	南非	82.5		18.1	钻爆		
	博尔门	瑞典	80		7.5	钻爆		
	加利福尼亚引水隧洞	美国	50.0		28.3	TBM		
	阿尔帕—谢万	前苏联	48.4	1 230	13.2	钻爆		[9]
	引黄工程 7 号隧道	中国	43.0		13.9			

续表 1.5 各国修建的部分特长隧道

使用分类	隧道名称	所在国家	长度(km)	最大埋深(m)	断面面积(m ²)	施工方法	竣工年代	文献
水 工 隧 道	莱索托	南非	45.0		19.6	TBM		[10]
	欧肯宾图穆特	澳大利亚	22.5		32.2	钻爆		
	莫惠恩戈	新西兰	19.3			钻爆		
	迪克桑斯	瑞士	19.2			TBM	正在施工	
	伊泽尔	法国	19.0		32.2	钻爆、TBM		
	黑泽姆	瑞典	16.3		110	钻爆		
	凯马诺	加拿大	16.2		45.4	钻爆		
	芝加哥3	美国	14.6		75.4	TBM		
	马丁纳	瑞士	14.3			TBM	1993	
	泰拉莫森	意大利	14.5		22.1	TBM		
	斯蒂尔沃特	美国	13			钻爆、TBM		
	马克斯今	美国	10.7		40.7	TBM		
	太平驿	中国	10.6	>300	72.4	钻爆		[12]
	天生桥	中国	10.0	760				[11]
铁 路 隧 道	Seikan(青函)	日本	53.9				1988	[13]
	Chanel II	英国-法国	50.5				1994	[21]
	Chanel I	英国-法国	50.5				1994	
	Dshimizu(大清水)	日本	22.2				1982	
	Simplon II(辛普伦II)	意大利-瑞士	19.8	2 140			1922	
	Simplon I(辛普伦I)	意大利-瑞士	19.8	2 136			1906	
	Vereina(费尔爱纳)	瑞士	19.1	1 200		TBM	2000	
	Shin Kanman(新关门)	日本	18.7				1975	[13]
	Appenine(亚平宁)	意大利	18.5	2 000			1934	[8]
	秦岭隧道	中国	18.4	1 600		钻爆、TBM		
	Rokko(六甲)	日本	16.3				1972	
	Furko(弗卡)	瑞士	15.4				1982	
	Haruna(榛名)	日本	15.4				1982	
	North Muya(北穆)	俄罗斯	15.3				1986	
	Santomerco(圣多马尔古)	意大利	15.0				1970	
	St.Gothard(圣哥达)	瑞士	15.0	1 706			1882	
	Nakayama(中山)	日本	14.8				1982	
	Cuajane(古詹尼)	秘鲁	14.7				1975	
	Loetichberg(列奇堡)	瑞士	14.6	1 640			1913	
	Macdonald(麦克唐纳)	加拿大	14.6				1989	

续表 1.5 各国修建的部分特长隧道

使用 分类	隧道名称	所在国家	长度 (km)	最大埋深 (m)	断面面积 (m ²)	施工 方法	竣工 年代	文 献
铁 路 隧 道	大瑶山	中 国	14.3	800			1988	
	Hokuriku(北陆)	日 本	13.9				1962	
	Mt.Cenis(仙尼斯峰)	意大利-法国	13.7	1 610			1871	
	Hex(海克斯)	南 非	13.5				1987	
	Shin Shimizu(新清水)	日 本	13.5	1 700			1967	
	Kamisaka(神坂)	日 本	13.3				1976	
	Ponte Gardena	意大利	13.2				1985	
	Aki	日 本	13.0				1975	
	Mt.Blanc(勃郎峰)	法-意	11.6	2 480				
	雁坂	日本	96.6					
	费儿艾那	瑞士	19.0			TBM, 钻爆	1997	
公 路 隧 道	阿尔贝格	奥地利	14.0					
	Frejus	意大利	12.9					
	坪林	中国台湾	12.9					
	勃朗峰	意大利	11.6				1965	
	关越	日本	11.1					
	Gransasso	意大利	10.2					

1988年,衡—广复线上长 14.3 km 的大瑶山隧道的建成使我国特长山岭隧道里程实现了零的突破。此后,我国在铁路建设中,选线越来越多地采用修建长隧道的方式,特别是在近年的新线建设中,深埋特长隧道不断增加,如 1999 年 8 月贯通的长 18.4 km、最大埋深 1 600 m 的西康线秦岭隧道,2000 年 2 月贯通的长 12.8 km 的朔黄铁路长梁山隧道及拟建的长 10.9 km、最大埋深 700 m 的渝怀线圆梁山隧道等。水电行业也在跨流域调水及大型水电工程中,兴建了许多特长引水隧洞,如全长 11.65 km 的引大入秦工程 30A 水工隧洞,全长 47 km 的山西引黄工程南干线 7 号水工隧洞及拟建的长 16~18 km、最大埋深达 2 500 m 的锦屏电站引水隧洞等。

1.3 特长隧道——未来山岭隧道的发展趋势

1.3.1 高速公路与(准)高速铁路——陆路交通的发展趋势

目前及今后相当长的时期内,可供人们选择的远距离交通工具主要是民航、铁路和公路。为了争夺客、货源,世界各国,尤其是发达国家,三大运输系统之间都在进行着激烈的竞争。由于三种运输方式各有自己的特点,尽管不同国家在不同时期由于人们主观认识的不同以及