

国家自然科学基金重点项目 (No.50434020)

联合资助

国家自然科学基金面上项目 (No.10972096)

大跨度公路隧道

开挖过程力学特性研究

郝哲 刘向峰 王来贵 著



地质出版社

国家自然科学基金重点项目 (No. 50434020)

国家自然科学基金面上项目 (No. 10972096)

联合资助

大跨度公路隧道开挖 过程力学特性研究

郝 哲 刘向峰 王来贵 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书针对大跨度公路隧道开挖过程力学特性的诸多方面进行了研究。主要包括：绪论，对大跨度公路隧道施工中若干问题的思考，大跨度公路隧道开挖过程模拟研究，大跨度公路隧道监测数据的时序分析方法研究，大跨度公路隧道围岩参数反分析方法研究，大跨度公路隧道长期稳定性分析等。

本书是作者近年来在该领域的研究成果的总结，可供交通、土木、水利、矿山等系统的广大科技工作者及相关专业的高校师生、研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大跨度公路隧道开挖过程力学特性研究/郝哲等著.
—北京：地质出版社，2010.1
ISBN 978-7-116-06469-0

I. ①大… II. ①郝… III. ①大跨度地下建筑物—公路隧道—隧道工程—工程力学—研究 IV. ①U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 004608 号

责任编辑：祁向霄 李丛蔚

责任校对：李 玫

出版发行：地质出版社

社址邮编：北京海淀区学院路 31 号，100083

电 话：(010) 82324519 (办公室)；(010) 82324577 (编辑室)

网 址：<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱：zbs@gph.com.cn

传 真：(010) 82310759

印 刷：北京地大彩印厂

开 本：787 mm × 1092 mm^{1/16}

印 张：7

字 数：200 千字

版 次：2010 年 1 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价：25.00 元

书 号：ISBN 978-7-116-06469-0

(如对本书有建议或意见，敬请致电本社；如本书有印装问题，本社负责调换)

前 言

伴随着我国公路隧道建设突飞猛进的发展，超大、超长公路隧道越来越多，遇到不良岩土体的概率愈来愈大，与之相关的工程新问题也不断涌现。与一般公路隧道和铁路隧道相比，大跨度公路隧道受力状态不理想、稳定性差，对开挖的速度和安全要求更高。现行规范主要适用于跨度在 15 m 以内的公路隧道工程，对三车道以上的大跨度公路隧道，既无成熟的计算方法可遵循，又无标准的设计规范可参照，因此在许多方面都面临着需要攻关的前沿课题。

针对大跨度公路隧道的自身特点开展研究以更有效地指导其设计和施工，已成为工程建设的迫切要求。本书正是针对当前大跨度公路隧道研究中存在的问题，结合现场实践，对其开挖过程中展现的力学特性进行系统的研究，以期给予大跨度公路隧道工程更高的科学指导。

全书体系如下：

绪论。对隧道和公路隧道的有关概念进行了阐述；对公路隧道尤其是长大隧道建设在国内外的的发展进行了评述和展望；对公路隧道的设计和施工方法进行了介绍；对公路隧道的计算理论与方法进行了评述；对公路隧道的工程分析方法，尤其是数值分析方法和相关软件做了系统综述。

对大跨度公路隧道施工中若干问题的思考。对大跨度公路隧道工程现场及其稳定性监测工作进行了详细介绍；针对现场实践，对有关大跨度隧道的监测技术、开挖变形及其主动控制等问题进行了探索和分析，提出了一些有益的观点，可供有关隧道工作者参考。

大跨度公路隧道开挖过程模拟研究。对大跨度公路隧道的开挖全过程进行了三维模拟，给出了隧道开挖在不同阶段的围岩应力、变形、塑性区的分布状态；剖析了监测点的位移和应力变化特征，据此对隧道稳定性进行评价。通过开挖过程的三维数值模拟，可了解大跨度隧道围岩应力分布及支护受力状态，剖析施工过程对围岩稳定的影响，从而为合理调整支护参数和措施提供重要依据和参考。

大跨度公路隧道监测数据的时序分析方法研究。建立了比较完整的大跨度隧道监测数据时间序列分析方法；编制了相应的分析程序；对现场隧道部分断面监测数据进行了时间序列分析，把握和预测了该隧道变形的整体动态规律，剖析了隧道系统的稳定性，提出了相关设想和建议。

大跨度公路隧道围岩参数反分析方法研究。基于三维模拟分析、正交设计和人工神经网络，建立了新的大跨度公路隧道围岩物理力学参数反分析方法，分析结果满足精度要求。该方法体现了正、反分析的动态耦合，既考虑到隧道工程本身的物理本质和变形机理，又兼顾了其非线性和不确定性的特征；可以将地质勘察、设计与施工三者融合在一起。该方法可以应用于各种隧道及地下工程的位移反演分析中，也可用于指导相应的工程设计与施工。

大跨度公路隧道长期稳定性分析。基于简化的黏弹性分析模型，得出了位移和应力分布规律的解析解，判定了围岩稳定性；通过二维弹塑性数值分析，给出了隧道开挖完毕后的弹塑性位移和应力状态；进行开挖完成瞬时弹性分析，为黏弹性分析提供了蠕变前的初始位移值；进行了大跨度公路隧道黏弹性数值分析，给出了开挖区长期蠕变位移的分布状态和规律，得出了蠕变效应对于隧道变形和长期稳定性的影响，预测了现场隧道在今后运营过程中的工作状态。

结语。对作者这方面研究工作进行了总结和展望。

本书总计近 20 余万字，是作者近年来在大跨度公路隧道领域的研究成果总结，也是国内第一本有关大跨度隧道方面的理论研究专著。全书内容较为丰富，涵盖了有关开挖前的分析、开挖全过程模拟、开挖过程监测与数据分析、正反耦合分析和长期运营时稳定性分析的隧道工程全过程。有关成果可为大跨度隧道的设计与施工提供更可靠的理论保证，建立的研究思路和方法对类似地下工程设计与施工具有较大参考价值。本书可供交通、土木、水利、矿山等系统的广大科技工作者及相关专业的高校师生、研究生参考。

在此，对在研究工作中曾给予笔者大量指导和帮助的刘斌教授、潘一山教授、梁冰教授、张永利教授、万明富教授级高工等老师和朋友表示感谢，对研究生王铁男等所做的书稿整理和排版工作表示感谢。

本书在写作过程中，参考了大量的相关书籍和文献，由于资料来源广、头绪多，可能难以一一予以注明和核查，请有关作者给予谅解，在此致以诚挚的谢意。

本书的完成和出版得到了国家自然科学基金重点项目（No. 50434020）、国家自然科学基金面上项目（No. 10972096）、交通部重点科技攻关项目（No. 20023533207）的资助和支持，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中错误在所难免，尤其书中内容多为作者自己的成果和观点，如有不妥之处，真诚期望同行专家及阅读本书的读者不吝赐教，提出宝贵的批评和建议。

目 次

前 言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 公路隧道建设在国内外的的发展	(1)
1.2.1 国外公路隧道建设概况	(1)
1.2.2 国内公路隧道建设概况	(3)
1.3 公路隧道设计方法	(5)
1.3.1 隧道工程的特点	(5)
1.3.2 公路隧道设计方法的发展	(6)
1.3.3 公路隧道设计方法	(7)
1.3.4 我国现行的公路隧道技术规范	(7)
1.4 公路隧道施工新奥法	(8)
1.4.1 公路隧道施工方法	(8)
1.4.2 新奥法简介	(8)
1.4.3 新奥法分类	(10)
1.5 公路隧道计算方法	(11)
1.5.1 发展历程	(11)
1.5.2 公路隧道计算方法	(13)
1.5.3 主要问题	(14)
1.6 公路隧道数值分析方法	(15)
1.6.1 岩土及隧道工程分析方法评述	(15)
1.6.2 隧道工程数值分析方法简述	(16)
1.6.3 常用数值分析软件评价	(17)
1.7 研究工作	(17)
第 2 章 对大跨度公路隧道施工中若干问题的思考	(19)
2.1 引言	(19)
2.2 大跨度公路隧道现场介绍	(19)
2.2.1 隧道概况	(19)
2.2.2 隧道区地质条件	(22)
2.2.3 现场监测工作说明	(23)

2.3	大跨度公路隧道的施工监测	(24)
2.3.1	现场隧道监测方法	(24)
2.3.2	监测方案设计	(26)
2.3.3	监测方法研究	(27)
2.4	对大跨度隧道开挖变形的思考	(28)
2.4.1	开挖力学行为简析	(28)
2.4.2	新奥法开挖的变形特征	(29)
2.4.3	初期支护(锚喷)分析	(30)
2.4.4	二次支护(模筑)分析	(30)
2.4.5	富含灰泥地层开挖变形特点分析	(31)
2.5	对大跨度隧道开挖中主动控制的分析	(31)
2.5.1	围岩稳定特征剖析	(31)
2.5.2	围岩变形主动控制方法	(32)
2.6	小结	(32)
第3章	大跨度公路隧道开挖过程模拟	(34)
3.1	引言	(34)
3.2	软件介绍	(34)
3.2.1	FLAC概述	(35)
3.2.2	FLAC-3D简介	(35)
3.2.3	FLAC-3D计算和分析步骤	(36)
3.3	计算模型建立	(37)
3.3.1	现场开挖方法	(37)
3.3.2	模拟程序流程	(37)
3.3.3	模型建立	(39)
3.3.4	开挖模拟步骤	(40)
3.3.5	初始网格剖分	(41)
3.4	程序模拟结果	(43)
3.4.1	不平衡力变化	(43)
3.4.2	应力分布	(43)
3.4.3	塑性区分布	(46)
3.4.4	位移分布	(47)
3.4.5	监测点应力	(50)
3.4.6	监测点位移	(50)
3.4.7	地表沉陷	(51)
3.5	计算结果分析	(51)

3.5.1	不平衡力分析	(51)
3.5.2	应力分布规律	(52)
3.5.3	位移分布规律	(53)
3.5.4	历史记录分析	(54)
3.6	小结	(55)
第4章	大跨度公路隧道监测数据的时序分析方法研究	(56)
4.1	引言	(56)
4.2	时间序列分析理论	(56)
4.2.1	时序分析基本原理	(56)
4.2.2	模型的识别	(57)
4.2.3	参数估计	(59)
4.2.4	模型检验	(62)
4.2.5	模型预测	(62)
4.3	现场隧道监测数据的时间序列分析	(63)
4.3.1	实测数据及其回归分析	(63)
4.3.2	时间序列分析	(65)
4.3.3	时间序列预测与数据的回复	(68)
4.3.4	位移长期预报	(69)
4.4	小结	(70)
第5章	大跨度公路隧道围岩参数反分析方法研究	(71)
5.1	隧道工程反分析方法综述	(71)
5.1.1	引言	(71)
5.1.2	反分析基本概念	(71)
5.1.3	反分析方法的选取	(72)
5.2	本章研究方法	(73)
5.3	依据正交设计法的数值模拟正分析	(74)
5.3.1	数值模拟计算方案确定	(74)
5.3.2	数值计算结果	(75)
5.4	基于人工神经网络的反分析	(76)
5.4.1	神经网络输入模型	(76)
5.4.2	神经网络优化	(76)
5.4.3	神经网络训练	(79)
5.4.4	神经网络预测	(79)
5.5	小结与展望	(81)
5.5.1	小结	(81)

第1章 绪 论

1.1 引言

隧道是指作为通道的、长度尺寸远大于断面尺寸（最大跨度或高度）的一类地下建筑物。它包括铁路隧道、公路隧道、地下铁道、煤炭运输巷道和洞室、金属矿山平巷和硐室、水工隧洞、人防地下通道等。按隧道区的地层条件不同，隧道可分为岩石隧道和软土隧道两种。岩石隧道大多修建在山体中，故又称山岭隧道；软土隧道常常修建在水底或城市立交路口，故又称水底隧道或城市道路隧道。

公路隧道是隧道的主要类型之一，是为公路从地层内部或水下通过而修筑的建筑物。修建公路隧道所需要的技术经济条件远高于铁路隧道和其他隧道工程。公路隧道通常包括主体和附属建筑两部分。公路隧道的主体建筑物由洞身衬砌和洞门建筑两部分所组成；公路隧道的附属建筑物，包括人行道（或避车洞）和防、排水设施，长及特长隧道还有通风道、通风机房、供电、照明、信号、消防、通讯、救援及其他测量、监控等附属设施。

伴随着公路隧道建设突飞猛进的发展，超大、超长的公路隧道越来越多，遇到不良岩土体的概率愈来愈大，与之相关的工程新问题也不断涌现。从标准断面来看，随着交通量的日益增大，两车道隧道（内轮廓净空面积 65 m^2 左右）已逐渐不能满足交通的功能需求，因此三车道断面（内轮廓净空面积 96 m^2 左右）、四车道断面（内轮廓净空面积 136 m^2 左右）等大跨扁平断面应运而生。一般的，跨度大于单洞两车道的隧道称为大跨度隧道，而四车道隧道可称为“超大跨隧道”。就长度而言，公路隧道长度大于 1000 m 称为长隧道，而大于 3000 m 称为特长隧道。

与一般公路隧道和铁路隧道相比，大跨度公路隧道跨高比大、扁平率高、受力状态不理想、稳定性差，对开挖速度和开挖安全的要求更高。而现行规范主要适用于跨度在 15 m 以内的公路隧道工程，对三车道以上的大跨度公路隧道，既无成熟的计算方法可遵循，又无标准的设计规范可参照，在诸多方面都面临着需要攻关的前沿课题。因此，针对大跨度公路隧道自身特点，对其力学特性开展深入研究，更有效地指导其设计和施工，已成为工程建设的迫切要求。

1.2 公路隧道建设在国内外的的发展

1.2.1 国外公路隧道建设概况

瑞士、奥地利、挪威、日本、美国等发达国家，从20世纪60~70年代起就开始修建一批特长公路隧道。统计目前已建成的国外著名的特长隧道见表1.1。

表 1.1 国外主要长大公路隧道

隧道名称	所在国	长度(跨度)/m	竣工年	车道×洞数
Laerdal	挪威	24500	2001	2×1
Gothard	瑞士	16322	1980	2×2
Gudvanga	挪威	11400	1991	2×1
Arlberg	奥地利	13972	1978	2×1
Frejus	法国、意大利	12868	1980	2×2
MontBlanc	法国、意大利	11600	1965	2×1
Folgefonn	挪威	11100	2001	2×2
关越	日本	10926	1985	2×1
东京港海底公路	日本	9400	1997	3×2
GranSasso	意大利	10175	1977	2×2
Seelisberg	瑞士	9280	1980	2×1
惠那山	日本	8649	1985	2×2
Gleinalm	奥地利	8320	1978	2×1
第二新神户	日本	7273	1988	2×1
新神户	日本	6910	1976	2×1
SteMarieauxmines	法国	6872	1976	2×1
Pfander	奥地利	6718	1980	2×1
SanBernardino	瑞士	6596	1966	2×1
东京港海底公路	日本	9400	1997	3×1
清溪隧道	韩国	(20.5)	1994	4×1
赐牌山隧道	韩国	(18.8)	2009	4×1
舞子隧道	日本	(19.05)	2005	3×1

目前,世界上已建成的最长公路隧道首推挪威的 Aurland-Laerdal 隧道,长 24500 m;最长水下公路隧道为日本东京港海底公路隧道,长 9400 m;最长超大跨隧道为韩国赐牌山隧道,长 3997 m,宽 18.8 m。

从发达国家的岩石隧道修建、维护的技术和经验看,①较为广泛地采用了新奥法,实现了真正的信息化设计与施工;②采用了先进的喷射混凝土工艺,较为成功地解决了喷射混凝土回弹;③防排水设计与施工工艺得到较好解决;新的支护手段在不断改进;④多种通风形式及静电吸尘等先进通风设备成功采用;⑤稳定可靠的公路隧道营运管理系统在多个发达国家经受了时间的检验;⑥公路隧道病害检测与治理手段均有新的突破,无损探测手段和新型高强材料已在瑞士、日本等发达国家得到较好应用;⑦针对公路隧道的高风险性进行了业主、设计方、监理及承包商的共同利益管理模式尝试,取得了不少经验;⑧盾构施工技术中已成功采用了直径 14.14 m 的巨型盾构机掘进,隧道掘进已采用了 11.93 m 的掘进机进行公路隧道施工;⑨采用 TBM 超前施工导洞,再结合钻爆扩挖的方法也在多个国家的长隧道施工中得到应用;⑩以美国、日本、荷兰为代表的国家,较成功地解决了

沉管隧道的结构形式、防水、基层处理、结构抗震等关键技术问题，使隧道成为跨江、跨海的重要手段，且备受重视；①最近为了解决跨越深水水域的问题，挪威、瑞士、日本、意大利等国都组织了专门机构进行悬浮隧道的专项研究。

1.2.2 国内公路隧道建设概况

新中国成立以前，我国已建隧道工程规模很小，施工技术和管理水平均很落后。新中国成立后，随着各项建设事业的发展，修建了大量铁路隧道工程。铁路隧道在数量、长度、设计和施工技术上处于领先地位；相比之下，公路隧道建设相对迟缓，数量很少，特别是因公路等级较低，同时限于设计、施工及短期投资大等多种原因，长大公路隧道更少。

改革开放以后，国民经济蓬勃发展，公路客货运输量大幅度增长，现有公路通行能力不足的矛盾日益突出，公路等级和技术标准迫切需要提高，高速公路将成为中国公路建设的主流。由于公路等级提高对线型和坡度的要求，高速公路越岭必然要求越来越多地采用隧道方案，这既能保证最佳道路线形便利行车，又可有效防止山地陡坡的滚石、泥石流等自然灾害，提高了行车的安全性和可靠性，同时又能和当地环境相协调并保全自然景观。据统计，隧道工程占高速公路工程的比例正逐年增加，这反映了我国公路隧道建设的经济实力的提高和技术水平的进步。

目前我国公路隧道工程在总量、单体长度、开挖跨度上均有了突飞猛进的发展，记录不断被刷新。已建成的有代表性的公路隧道如：①岩石隧道：1995年开通的成渝高速公路的中梁山隧道和缙云山隧道，把我国公路隧道单洞长度提高到3000 m以上，并在处理通风、塌方、瓦斯、地下水、营运管理与交通监控技术等方面取得了突破性进展，为我国今后修建长大公路隧道积累了一些宝贵经验；1999年通车的四川省川藏公路上二郎山隧道，全长4.16 km，是连接西藏与内地的重点工程；1999年通车的四川广安地区华蓥山公路隧道，右线全长4.634 km、左线全长4.706 km，是我国目前已通车的最长公路隧道；云南楚大高速公路的九顶山隧道单洞累计长度为6403 m（上行线长3204 km，下行线长3199 m）。②水底隧道：1994年6月穿越广州珠江沙面水下公路隧道建成通车，标志着我国水下沉埋隧道修建技术达到了新的水平；上海穿越黄浦江江底隧道长度超过3000 km。③大断面隧道：重庆铁山坪路隧道双线全长5424 m（目前国内最长的大跨度公路隧道）、北京至八达岭高速公路的谭峪沟隧道（目前国内最宽的三车道公路隧道）、重庆市川黔公路的真武山隧道、沈大高速公路韩家岭隧道（亚洲最宽的四车道公路隧道——本书的工程实例）等。应当说，目前我国公路隧道的施工技术水平已接近国际先进水平，部分已达到国际先进水平。

表1.2中列出了我国已建成有代表性的公路隧道，基本都是近十年建成的。

据不完全统计，目前我国公路通车里程已超过160万 km，高等级公路已从沿海地区向西南、西北山岭地区延伸；公路隧道建设规模越来越大，一大批长隧道和特长隧道相继建成。目前建成的公路隧道总数已超过1000座；长千米以上的有40多座；3000 m以上的特长隧道13座；1500 m以上的3车道公路隧道5座；盾构隧道2座；沉埋隧道2座；连拱隧道也越建越多，长度达到700 m左右。

按照交通部规划，我国10年内将新建成40万 km新路，“五纵七横”国道主干线将贯通。10年内，我国将再建设总长155 km以上的公路隧道。有代表性的有：建成不久的

表 1.2 我国已建长大公路隧道

隧道名称	所在省	长度(跨度)/m	竣工年	车道×洞数	
山岭隧道	秦岭终南山隧道	陕西	18020	2007	2×2
	华蓥山隧道	四川	4706	1999	2×2
	二郎山隧道	四川	4160	1999	2×1
	大溪-湖雾岭隧道	浙江	4116	1999	2×2
	尖山子隧道	重庆	4020	2001	2×2
	牛郎河隧道	山西	3922	1999	2×2
	云台山隧道	江苏	3800	1992	2×1
	猫狸岭隧道	浙江	3600	1999	2×2
	潭峪沟隧道	北京	3400	1997	3×1
	大风丫口隧道	云南	3290	2002	2×2
	九顿坡隧道	云南	3200	1999	2×2
	中梁山隧道	重庆	3165	1994	2×2
	飞鸾岭隧道	福建	3155	1999	2×2
	清潭隧道	广东	3020	1999	2×2
	靠椅山隧道	广东	2981	2000	3×2
	铁山坪隧道	重庆	2750	1999	3×2
	真武山 2 号隧道	重庆	2000	2000	3×2
	大宝山隧道	广东	1565	1999	3×2
大梅沙隧道	广东	1520	1999	3×2	
盾构隧道	打浦路隧道	上海	2261	1997	2×2
	延安东路隧道	上海	2761	1985	2×1
沉埋隧道	珠江隧道	广东	1238	1994	2×2
	甬江隧道	浙江	1019	1995	2×1
大跨隧道	大阁山隧道	贵州	(22.0)	2002	4×1
	韩家岭隧道	辽宁	(22.48)	2003	4×1
	雅宝隧道	广东	(21.1)	2006	4×1
	大坪隧道	重庆	(23.0)	2007	4×1
	龙头山隧道	广东	(20.5)	2008	4×1

注：不含台湾省及香港特别行政区。

双向分离式四车道秦岭终南山特长公路隧道长达 18.02 km，与已建成的中国第一长隧西安安康铁路秦岭隧道并行，长度居亚洲第一，世界第二；湖南雪峰山隧道长超过 7 km；西安汉中高速公路上穿越秦岭的三座特长隧道群总长 34 km，全线隧道总长 100 km；上海崇明岛和武汉的长江上将建设大型过江通道工程；全国海拔最高的鹧鸪山公路隧道（海拔 4000 m）正在施工。一些跨江、跨海隧道方案也相继提出，如国内已对琼州海峡隧道完成了可行性研究，不少有识人士还提出了跨越渤海湾连接辽东与胶州半岛的南桥北隧固

定联络隧通道，跨越长江入海口连接上海—崇明—启东的江底隧道，京沪、京广高速铁路跨越长江的沉管隧道，甚至提出了兴建台湾海峡隧道的设想。以上种种构想，无疑为 21 世纪的中国公路隧道建设提出了新的课题。

在 20 多年的快速发展时期，我国的公路隧道建设取得了举世瞩目的巨大成就，完成了宝贵的公路隧道经验积累，在设计、施工、科研乃至现代化管理方法等方面，为今后修建长大公路隧道及克服各种复杂困难条件奠定了坚实的基础。最近，王梦恕就建议对我国隧道建设工作进行全面总结，并提出了“中国隧道修建法”的概念^[7]。

1.3 公路隧道设计方法

1.3.1 隧道工程的特点

与地面结构工程和其他岩土工程相比，隧道工程在很多方面具有完全不同的特点，主要表现在以下几个方面：

- 受力特征是先有荷载，后有结构

地面工程结构是经过工程施工，形成结构后，承受自重、风、雪以及其他静力或动力荷载；而隧道工程是在处于自然状态下的岩土地质体内开挖的，在工程开挖之前就存在着应力环境（地应力），所以，隧道工程是先有荷载，后有结构。

- 工程材料特性的不确定性

隧道工程材料所涉及的材料，除了支护材料性质可控制外，其工程围岩均属于难以预测和控制的地质体。地质体是经历了漫长的地质构造运动的产物，不仅包含大量的断层、节理、夹层等不连续介质，而且还存在着较大程度的不确定性，这主要体现在空间的分布和随时间的变化。

(1) 空间上的不确定性

对于隧道工程围岩，不同位置围岩的地质条件（岩性、断层、节理、地下水条件、地应力等）存在着差异，人们通过有限的地质勘察、取样试验，仅仅是对整个工程岩体的特性进行抽样分析和研究，很难全面掌握整个工程岩体的地质条件和力学特性。

(2) 时间上的不确定性

即使对于同一地点，在不同的历史时期，其地应力、力学特性等也会发生变化，这就是时间上的不确定性。尤其开挖后的工程岩体特性除随时间的变化外，更重要的还与开挖方式、支护形式和施工时间与工艺密切相关，这常常是一个十分复杂的变化过程。

- 工程荷载的不确定性

对于隧道工程，工程围岩的地质体会对支护结构产生荷载，加上它自身又是一种承载体，因此，不仅作用到支护结构上的荷载难以估计，而且由于此荷载又是随着支护类型、支护时间与施工工艺的变化而变化，所以对于隧道工程的计算与设计，一般难以准确地确定作用到结构上的荷载类型和量值大小。

- 破坏模式的不确定性

工程分析的主要目的在于为工程设计提供评价结构破坏或失稳的安全指标（如安全

系数、可靠性指标等)。对于隧道工程,其破坏模式一般难以确定,因为它不仅取决于岩土体结构、地应力环境、地下水条件,而且还与支护结构类型、支护时间与施工工艺密切相关。

- 信息的不完备性

地质力学与变形特性的描述或定量评价取决于所获取信息的数量与质量。然而对于隧道工程,有关的地质力学信息只是通过局部的有限工作面或露头获取,因此所获取的信息是有限的、不充分的,且可能存在错误。

- 信息的模糊性

针对隧道工程围岩的力学与变形特征的描述对于隧道工程设计与分析是重要的。但影响岩体工程特性的材料与参数多数是定性的,且节理特征、充填物性质以及岩性的描述等又都具有模糊性。

1.3.2 公路隧道设计方法的发展

隧道工程的特点直接导致了其与其他结构完全不同的设计方法。隧道工程设计一般包括两个方面^[3]:其一,几何尺寸与断面形状设计;其二,开挖与支护设计。前者的设计主要是根据隧道工程类型及使用要求来确定的,后者则是以隧道工程稳定性为目标所采用的施工工艺、支护类型与参数。

力学计算表明,隧道工程设计的基本原则是应充分利用岩土体本身作为支护的主要结构材料,在施工过程中则尽量避免破坏围岩,并尽可能减少混凝土或金属支护的用量。当围岩处于未扰动状态并承受压应力时,大多数坚硬岩石的强度远比混凝土高,且许多岩石与钢的强度属于同一数量级。因此,用并不比岩石更为合适的材料去替换岩石的做法是不可取的。

隧道工程的设计理论和方法经历了一个发展过程。最早(19世纪初期)的隧道工程多以砖石材料为衬砌,采用木支撑和断面分部开挖的施工方法,即当时隧道衬砌的设计是仿照拱桥进行的,其特点是只考虑了衬砌承受围岩的主动荷载而未考虑围岩对衬砌变形的约束和由此产生的抗力,隧道厚度偏大;其后,不同学者和工程师们在设计隧道衬砌时采用不同的假设来计算围岩对衬砌变形所产生的抗力,其中,Winkler局部变形理论得到了广泛的应用,与此同时,将衬砌和围岩视作连续介质模型进行分析的方法也得到了发展;20世纪50年代以来,喷射混凝土和锚杆被广泛用作初期支护,人们逐渐认识到,这种支护能在保证围岩稳定的同时,允许其有一定程度的变形,使围岩内部应力得到调整从而发挥其自承作用,因此,可以将内层衬砌的厚度减小很多;20世纪60年代中期以来,随着计算机内存的增大和计算速度的快速提高,以及岩土本构模型研究的进展,隧道工程进入了数值分析时代,它使隧道的设计与施工建立在更可靠的数值计算结果基础之上。另外,在隧道工程监测和信息化设计方面,发展以位移测试为主体的隧道施工监测系统以及依据监测信息来反馈设计等方面都有长足的进展。当然,隧道工程设计水平的提高,最终仍将依赖于理论上的发展和突破。

在不同的隧道工程的设计中,对工程位置选择的限制存在较大区别,如铁路、公路隧道位置的选择和优化直接影响工程投资、运营成本和经济效益等;而矿山地下巷道是针对

特定矿床开采所开挖的地下工程，因而其位置的选择余地较小。由于不同工程类型对其稳定性的要求不同。因此，在支护选型和支护强度上也应有不同的考虑。

1.3.3 公路隧道设计方法

统计世界上各国所采用的不同隧道设计模型，见表 1.3 所示。

表 1.3 隧道结构设计模型

国家	锚喷、钢拱支护软土隧道	中硬岩质深埋隧道	盾构开挖软土隧道	明挖施工 框架结构
澳大利亚	初期支护：Proctor-white 法；二次支护：弹性介质中全支承圆环，Muir Wood 法、Curtis 法，或假定隧道变形	初期支护：Proctor-white 法；二次支护：弹性介质中全支承圆环，Muir Wood 法、Curtis 法，或假定隧道变形	弹性介质中全支承圆环；Muir Wood 法、Curtis 法；或假定隧道变形	箱形框架弯矩分配法
奥地利	弹性地基圆环；FEM；收敛约束法	经验方法	弹性地基圆环	弹性地基框架
德国	覆盖 < 2D；顶部无支承弹性地基圆环；覆盖 > 3D；全支承弹性地基圆环；FEM	全支承弹性地基圆环；FEM；连续介质或收敛约束法	覆盖 < 2D；顶部无支承弹性地基圆环；覆盖 > 3D；全支承弹性地基圆环；FEM	弹性地基框架（底压力分布简化）
法国	FEM；作用-反作用模型；经验法	连续介质模型；收敛约束法；经验法	弹性地基圆环；FEM	——
日本	局部支承弹性地基圆环；经验法加测试；FEM	弹性地基框架；FEM；特征曲线法	局部支承圆环	弹性地基框架；FEM
瑞士	作用-反作用模型	FEM；经验法；（有时用）收敛约束法	——	——
英国	收敛约束法；经验法	FEM；经验法；收敛约束法	弹性地基圆环；Muir Wood 法	矩形框架
美国	——	弹性地基圆环；Proctor-white 法；FEM；锚杆按经验	弹性地基圆环	弹性地基连续框架
瑞典	——	（通常为）经验法；作用-反作用法；连续介质模型；收敛约束法	——	——
比利时	——	——	Schulze-Dudeek 法	刚架
中国	初期支护：FEM，收敛约束法；二次支护：弹性地基圆环	初期支护：经验法；永久支护：作用-反作用模型；大型硐室；FEM	弹性地基圆环；经验法	箱形框架弯矩分配法

1.3.4 我国现行的公路隧道技术规范

目前国内制定的与公路隧道工程的设计、勘测、施工、养护等相关的技术规范主要

有：《公路隧道设计规范》（JTGD70-2004）、《公路隧道施工技术规范》（JTJ042-94）、《公路工程地质勘察规范》（JTJ064-98）、《公路隧道交通工程设计规范》（JTG/T D71-2004）、《公路隧道通风照明设计规范》（JTJ026.1-1999）、《公路隧道养护技术规范》（JTG H12-2003）等。

在我国的公路隧道设计中，特别指出要根据现场具体情况进行分析。由此可见，隧道开挖前所提出的设计与地面结构物的设计不同，在严格意义上说只能称其作“预设计”。根据对隧道开挖过程中力学行为的研究量测来论证和调整设计参数也是隧道设计中一个十分重要的环节。

1.4 公路隧道施工新奥法

1.4.1 公路隧道施工方法

常见的公路隧道施工方法包括：矿山法、掘进机法、沉管法、顶进法和明挖法等。

矿山法包括传统矿山法和新奥法，因其最早应用于矿山开采而得名。由于这种方法多数情况下都需要采用凿眼爆破进行开挖，故又称为钻爆法，有时为了强调新奥法与传统矿山法的区别，而将新奥法从矿山法中分出另立系统。

掘进机法包括隧道掘进机（TBM）法和盾构掘进机法，前者应用于岩石地层，后者则主要应用于土质围岩，尤其适用于软土、流沙、淤泥等特殊地层。

沉管法、顶进法和明挖法等则是用来修建水底隧道、地下铁道、城市市政隧道，以及埋深很浅的山岭隧道。

现场隧道施工中，具体施工方法的选择要综合考虑如下几个方面：

- ▶ 工程的重要性。一般由工程的规模、使用上的特殊要求以及工期的缓急体现出来；
- ▶ 隧道所处的工程地质和水文地质条件；
- ▶ 施工技术条件和机械装备状况；
- ▶ 施工中的动力和原材料供应情况；
- ▶ 工程投资和运营后的社会效益和经济效益；
- ▶ 施工安全状况；
- ▶ 有关污染、地面沉降等环境方面的要求和限制。

由于隧道工程遇到的地质条件的复杂性及多变性，加上地质勘探的局限性，在隧道施工过程中经常会遇到地质突变情况、意外塌方或涌水等问题，使原制定的施工方案、技术措施和进度计划等也必须随之变更。因此，在隧道施工中应详细制定出灵活多变和实用的隧道施工方案，以适应客观条件的变化，及时地正确地处理隧道施工中所遇到的千变万化的各类实际问题。

从目前我国公路隧道的发展趋势来看，在今后很长一段时期内，仍将以矿山法为主，而作为矿山法发展的新奥法已成为当前应用最为广泛的隧道施工方法。下面将着重对新奥法作以阐述。

1.4.2 新奥法简介

新奥法（NATM），即“新奥地利隧道建造法（New Austrian Tunneling Method）”，是