

特殊地质及特殊结构交通隧道建设关键技术丛书

小净距隧道建设关键技术

丁 睿 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

小净距隧道建设关键技术 / 丁睿著. —成都: 西南交通大学出版社, 2020.5
(特殊地质及特殊结构交通隧道建设关键技术丛书)
ISBN 978-7-5643-7429-7

I. ①小… II. ①丁… III. ①隧道工程 IV. ①U45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 077094 号

特殊地质及特殊结构交通隧道建设关键技术丛书

Xiaojingju Suidao Jianshe Guanjian Jishu

小净距隧道建设关键技术

丁睿 / 著

责任编辑 / 姜锡伟

封面设计 / 曹天擎

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 22.75 字数 568 千

版次 2020 年 5 月第 1 版

印次 2020 年 5 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-7429-7

定价 158.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

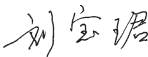
我国是一个多山的国家，受地理、地形环境因素的影响，隧道工程建设数量和规模居于世界前列，是名副其实的隧道大国。由于线路线形、地质构造、建设环境等的影响和要求，各种不良地质隧道和特殊结构型式隧道也越来越多。

作为特殊结构型式隧道的一种，小净距隧道中隔岩柱厚度远小于分离式隧道，在修建过程中，由于二次应力场叠加，会出现应力集中和塑性区，导致隧道结构易失稳、破坏，乃至坍塌，其支护结构的受力机制、设计和施工方法与普通隧道有明显不同，建设难度和风险更大，有必要对这种隧道修建技术进行系统的总结和梳理。

本书作者有着丰富的隧道工程建设经验，具备扎实的理论功底，在不良地质隧道和特殊结构型式隧道修建技术方面做出了有益的探索和总结。本书围绕小净距隧道这种特殊的隧道结构修建，在数学力学理论、设计关键技术、施工关键技术和监控量测四个方面进行了较为系统深入的论述：在数学力学理论方面，详细分析了隧道开挖的解析解求解过程，推导了双洞马蹄形断面隧道开挖解析解求解方法，丰富了小净距隧道修建的数学和力学理论方法；围绕小净距隧道设计的关键问题，阐述了深埋、浅埋不同工况下设计荷载的确定，论证了两洞间科学合理的净距取值，阐述了各种施工方法的力学行为和变形机理；在施工技术方面，基于小净距隧道地质条件差、周边环境复杂以及结构受力薄弱等特点，系统阐述了加固技术应用实施的针对性和有效性，针对隧道施工常用的钻爆法和铣挖法，从理论、设计到实施，进行了系统全面的阐述，分析了相关开挖技术应用于小净距隧道的注意事项；在监控量测方面，系统地总结了监控量测体系的构建，以及如何用于完善理论分析、反馈修正设计、指导施工。

本书的鲜明特点是理论密切结合工程实践，其理念、观点和方法都是建立在作者长期工程实践的基础上，这就使本书具有鲜明的工程背景，也正是其水平和实用价值之所在。其中，无论是超前加固技术还是开挖技术相关内容，都有作者详细的工程实践经验和心得体会，不仅仅是对小净距隧道工程，对于其他类型隧道和地下工程，亦有重要的参考价值和借鉴意义。我相信，本书的出版对广大隧道工作者会有所裨益，对小净距隧道工程修建技术的发展也会有推动作用。

我与丁睿博士相识已十余年，这些年来他一直辛勤工作在隧道建设第一线，也欣慰于这些年来他在隧道工程建设技术领域的追求和进步。“桐花万里丹山路，雏凤清于老凤声。”在隧道工程建设技术发展的征程中，祝愿青年技术工作者在技术攻关的道路上更进一步，取得更大的成绩。

中国科学院院士 

2020年4月1日

前 言

我国是一个多山的国家，随着近年基础设施建设方兴未艾，隧道工程建设进入了高速发展的黄金时期，小净距隧道这种特殊结构型式的隧道工程也越来越多。

以公路隧道为例，我国公路隧道设计为上、下行分离的独立双洞，当两洞净距超过各自的扰动影响宽度之和时，两隧道施工才相互独立、互不影响。从理论上讲，将两相邻隧道分别置于围岩压力相互影响及施工影响范围之外，有利于降低支护结构造价与施工难度，这一规定在公路隧道建设中也发挥了积极作用。但是，在山地地形陡峭、接线困难区域或城市建筑物密集、线路位受限区域，隧道与洞外接线的矛盾将会十分突出，大量的挖填方工程也会加大对自然环境的破坏。小净距隧道具有减少占地、降低投资、节约地下空间、保护环境等优点，成为特定地形、环境条件下修建隧道的理想选择之一。

小净距隧道施工力学行为远较普通分离式双洞隧道复杂，由于其中隔岩柱厚度较小，双洞施工相互干扰、影响严重，受力体系转换频繁，开挖后产生的应力交叠极易导致围岩变形，产生较大的塑性区，使衬砌结构承受较大的围岩压力，甚至导致结构失稳、破坏。因此，小净距隧道的受力机制、设计和施工方法也与其他结构型式隧道的侧重点不同，建设难度和风险更大。

隧道小净距洞段多位于进出洞浅埋区域，围岩松软破碎、自稳性差，城市小净距隧道更是以第四纪沉积系地层为主，工程地质具有非连续、非均匀、流-固耦合的特性，普遍具有低强度、高含水率、高压缩性等不良工程特性。这些条件都不利于工程施工，容易诱发灾害。此外，随着隧道工程埋深的减小，开挖对地面的影响越来越大，在浅埋、超浅埋条件下，开挖影响的控制与开挖方式、施工工艺、支护方法等众多因素有关，是地下工程施工中最为复杂的问题。

在城市区域修建小净距隧道，不可避免地要邻近或穿越既有建筑物、道路、立交桥桩基础、既有隧道、地下管线等施工，工程建设常在人口集中、大型建筑物密集、管线密布、工程地基别无选择的工程环境下进行。在这种客观环境条件下，沉降变形要求极为严格，城市小净距隧道施工的风险性极高：在不良地质体的影响下，隧道施工引起的地层突然破坏和地表坍塌；施工引起的管线或地下构筑物破坏，继而造成灾害；施工引起的地层变形过大，造成地面建筑物破坏。一旦发生事故，后果将非常严重。

小净距隧道大多采用钻爆法开挖，爆破振动控制要求严格。后行洞爆破开挖会对先行洞结构造成扰动，影响先行洞结构安全，同时会引起爆源附近地表及地中构筑物振动。当爆破振动达到一定强度时，会对附近构筑物或管线造成损伤或破坏，如造成建筑物墙体开裂、附属物垮落、管线破裂等，严重时甚至可能造成建筑物倒塌的灾难后果。

正是由于小净距隧道工程具有地质及环境条件复杂、施工难度大、技术要求高、对环境影响控制要求严等特点，其修建是一项相当复杂的高风险性系统工程。有鉴于此，作者基于参建的都汶高速紫坪铺隧道、贵阳北京东路隧道、济南顺河高架玉函路隧道、厦门万石山钟鼓山隧道群、贵阳地铁二号线等具有典型特点和代表性的小净距隧道工程，同时综合国内其他大量小净距隧道工程实例分析、总结，精心编撰完成本书。

本书在编写过程中，注重理论联系实际，强调理论与技术在工程实践中的应用：首先从数学力学角度，详细推导了双洞隧道开挖的解析解求解，完善了理论体系；在此基础上，针对小净距隧道设计关键技术，重点论述了设计荷载确定、合理净距确定、支护设计及施工方法选择；在施工关键技术方面，结合工程地质及周边环境特点，系统深入地阐述了超前加固技术、开挖技术、监控量测及反馈分析等关键技术；最后一章详细介绍了两个特色鲜明的非对称小净距隧道工程案例，很有参考、借鉴价值。各个章节既有系统的理论分析，又有翔实的作业指导，更有鲜明的工程案例。同时，本书也结合了作者在隧道工程建设领域多年的经验与心得。

二十一世纪，是人类开发利用地下空间大发展的新时代，对于隧道及地下工程业内人士而言，这是最好的时代。“登山则情满于山，观海则意溢于海”，治学、从业二十余年，我始终对隧道和地下工程这个领域充满了热爱与敬畏，而这热爱与敬畏，将是我持续前行的动力。

在本书编写过程中，中国科学院院士刘宝珺先生给予了大量指导并友情作序，中铁二局杨家松总给予了帮助并提出了宝贵意见，在此对他们致以衷心感谢！书稿绝大部分工程案例来自作者参建的工程项目，感谢项目技术干部对于作者给予的帮助和支持！此外，本书引用、参考了大量专业书籍及文献，在此，对原作者致以真诚的感谢！

限于作者水平，书中疏漏在所难免，不足之处，敬请广大读者批评指正。

丁 睿
2020年4月于成都

目 录

第 1 章 小净距隧道概述	1
1.1 隧道结构型式比选	2
1.2 隧道净距影响	3
1.3 工程案例	5
第 2 章 小净距隧道开挖理论解析解	19
2.1 单洞圆形断面隧道开挖经典解析解	20
2.1.1 应力场的理论解析	20
2.1.2 位移场的理论解析	24
2.2 单洞圆形断面隧道开挖复变函数解析解	25
2.2.1 弹性力学的复变函数表示	25
2.2.2 圆形隧道围岩应力场的柯西积分解法	28
2.3 单洞马蹄形断面隧道开挖解析解	31
2.3.1 等代圆方法	31
2.3.2 复变函数方法	33
2.4 双洞马蹄形断面隧道开挖解析解	42
2.4.1 Schwarz 交替法	42
2.4.2 解析延拓法	42
2.4.3 双洞任意形状断面隧道开挖的解析延拓法求解	43
2.4.4 双洞马蹄形断面隧道开挖解析解求解	47
第 3 章 小净距隧道设计关键技术	48
3.1 分 类	49
3.2 设计荷载确定	50
3.2.1 深埋和浅埋隧道分界标准	51
3.2.2 深埋小净距隧道设计荷载	52
3.2.3 浅埋小净距隧道设计荷载	55
3.3 合理净距	60
3.3.1 基于开挖力学分析的合理净距	60
3.3.2 基于强度折减法的合理净距	70
3.3.3 基于开挖弹性应变能密度的合理净距	71

3.4	支护设计	78
3.4.1	超前支护设计	79
3.4.2	初期支护设计	80
3.4.3	二次衬砌设计	83
3.4.4	预留变形量	83
3.5	设计案例	83
3.5.1	济南顺河高架玉函路隧道	83
3.5.2	贵阳北京东路隧道	93
3.5.3	都汶高速紫坪铺隧道	104
第 4 章	小净距隧道施工力学行为与施工方法	113
4.1	施工力学行为	115
4.1.1	围岩及隧道变形分析	116
4.1.2	围岩应力分析	117
4.1.3	塑性区分析	118
4.2	施工方法	119
4.2.1	全断面开挖法	121
4.2.2	台阶法	122
4.2.3	中隔壁法和交叉中隔壁法	125
4.2.4	双侧壁导坑法	127
第 5 章	小净距隧道超前加固技术	129
5.1	注浆	129
5.1.1	注浆原理	129
5.1.2	注浆分类	132
5.1.3	注浆材料	134
5.1.4	注浆设计	139
5.1.5	注浆设备及器具	144
5.1.6	注浆工艺	149
5.2	超前长管棚	151
5.2.1	施工准备	152
5.2.2	工作室施工	152
5.2.3	钻孔	154
5.2.4	注浆	154
5.2.5	注意事项	155

5.3	超前小导管和超前锚杆	155
5.3.1	超前小导管	156
5.3.2	超前锚杆	157
5.4	中隔岩柱加固	159
5.4.1	中隔岩柱受力特性	159
5.4.2	中隔岩柱加固	161
5.5	周边环境预加固与保护	166
5.5.1	隔离桩保护	167
5.5.2	袖阀管加固与保护	168
5.6	工程案例	170
5.6.1	贵阳地铁七云区间隧道	170
5.6.2	都汶高速紫坪铺隧道	176
5.6.3	济南顺河高架玉函路隧道	179
第 6 章	小净距隧道开挖技术	189
6.1	爆破开挖技术	189
6.1.1	炸药破岩机理	189
6.1.2	小净距隧道爆破设计	191
6.1.3	爆破振动控制	216
6.1.4	爆破开挖施工	223
6.2	铣挖法开挖技术	228
6.2.1	装配式铣挖机施工	229
6.2.2	整体式悬臂掘进机施工	230
6.3	工程案例	235
6.3.1	都汶高速紫坪铺隧道	235
6.3.2	贵阳北京东路隧道	247
6.3.3	济南顺河高架玉函路隧道	264
第 7 章	小净距隧道施工监测及沉降预测技术	279
7.1	施工监控量测项目与方法	279
7.1.1	隧道及围岩沉降位移变形监测	280
7.1.2	围岩及隧道应力监控量测	284
7.1.3	浅埋洞段环境监测	286
7.1.4	中隔岩柱监测	289

7.2	监控量测信息分析与反馈	291
7.2.1	隧道沉降位移变形信息分析	291
7.2.2	地表沉降信息分析与预测	293
7.2.3	监控量测数据的反馈方法	297
7.3	监控量测控制准则	297
7.4	工程案例	300
7.4.1	都汶高速紫坪铺隧道	300
7.4.2	贵阳北京东路隧道	312
7.4.3	济南顺河高架玉函路隧道	320
第 8 章	特殊型式小净距隧道工程案例	324
8.1	厦门万石山钟鼓山地下互通立交隧道群	324
8.1.1	工程概况	324
8.1.2	小净距洞段施工	326
8.1.3	控制爆破	329
8.1.4	立交近接施工	338
8.2	成都地铁 3 号线设计起点—红牌楼南站区间隧道	343
8.2.1	工程概况	343
8.2.2	施工方案	346
8.2.3	降水施工	347
8.2.4	下穿运营西环铁路	348
8.2.5	下穿既有建筑物	350
8.2.6	建筑物及重要管线监控量测	352
	参考文献	354

第 1 章 小净距隧道概述

近年来，随着国民经济突飞猛进的增长，城市间综合交通压力越来越大，城市内交通基础设施要求也越来越高。国家系统规划建设目标，大力发展基础设施，进入了交通工程大发展的年代。

公路领域，截至 2019 年年底，我国高速公路通车里程已达 14.26 万千米，位居世界第一。按照《国家公路网规划（2013—2030 年）》，国家高速公路网由 7 条首都放射线、11 条南北纵线、18 条东西横线以及地方环线、并行线、联络线等组成；在国家高速公路网的基础上，各省（自治区、直辖市）纷纷编制地方高速公路网规划，逐渐形成了以国家高速公路为骨架、以地方高速公路为补充的高速公路网规划格局。

铁路领域，高铁已成为我国发展和创新的一张名片。截至 2019 年年底，铁路营业里程已达 13.9 万千米，其中高铁 3.5 万千米，分别居世界第二和第一位。《中长期铁路网规划》勾画了新时期“八纵八横”高速铁路网的宏大蓝图，即以沿海、京沪等“八纵”和陆桥、沿江等“八横”通道为主干，城际铁路为补充的高速铁路网，实现相邻大中城市 1~4 小时交通圈、城市群内 0.5~2 小时交通圈。

我国城市轨道交通发展亦是迅猛，截至 2019 年年底，已有北京、上海、广州、深圳等 33 个城市开通了运营，营业里程达 6 730 km，位居世界第一。目前，共有 58 个城市获批开展城市轨道交通建设（含地方政府批复的 14 个城市），其中，已有 40 个城市运营轨道交通。规划、在建线路规模进一步扩大，建设速度稳步提升。

我国是一个多山的国家，山地和丘陵占国土面积的 43%。受地理、地形环境因素的影响，公路、铁路规划和设计日益重视隧道工程的研究和比选，隧道建设的数量和规模越来越大。截至 2016 年年底，我国已经建成总长度超过 30 000 km 的交通隧道工程，正在规划和建设的超过 40 000 km，成为名副其实的隧道大国。

以交通工程中较具代表性的公路为例，隧道设计受路线线位、纵坡、地形条件及地质复杂程度等因素制约，一般设计为上、下行分离的独立双洞。双洞的最小间距，按双洞结构彼此不产生有害影响的原则，结合隧道平面线形、围岩地质条件、断面形状和尺寸、施工方法等因素确定。《公路隧道设计规范》（JTG D70—2004）规定了分离式双洞隧道的间距，如表 1.1 所示。

表 1.1 分离式独立双洞间的最小净距

围岩级别	I	II	III	IV	V	VI
最小净距	$1.0 \times B$	$1.5 \times B$	$2.0 \times B$	$2.5 \times B$	$3.5 \times B$	$4.0 \times B$

注：B 为隧道宽度（m）。

在地形陡峻、脊谷相间、桥隧相连地带，为了满足双洞净距的要求，往往强行拉开隧道间距，导致工程占地较宽、洞口挖方量大、与隧道相邻路段平面线形不顺畅等突出问题。为了解决分离式隧道在特定环境条件下的缺陷和不足，连拱隧道及小净距隧道等新型隧道结构型式应运而生。自从小净距隧道这种结构型式在公路隧道中出现以来，由于其自身优点，得到越来越广泛的重视和应用，并推广应用于各个城市地铁区间、折返线、配线的设计和施工中。

1.1 隧道结构型式比选

小净距隧道是指上、下行双洞洞壁净距较小，不能按独立双洞考虑的隧道结构。其结构型式特点是双洞间分隔岩柱厚度较小，结构设计尽量发挥分隔岩柱的承载作用，适用于以下特殊地形地质环境：

(1) 在洞口地形比较狭窄、陡峭，上、下行线难以拉开独立成双洞时，采用小净距隧道可以避免大量深挖高填的土石方工程，减少对自然环境的破坏，确保桥隧衔接平顺。

(2) 在城市地区修建隧道时，土地资源紧张，采用小净距隧道可大幅减少拆迁，显著降低工程费用。

(3) 地面地形起伏较大、地表建筑基础复杂，或受地铁车站站位接口、线路配线原因影响，采用常规隧道结构型式难以选出合适线路时，采用小净距隧道可尽量避开建筑基础和地下管线，最大限度地满足线路选线要求。

科学合理的隧道设计方案可缩短隧道长度、节约投资、保护环境。分离式隧道、小净距隧道和连拱隧道三种隧道结构型式基本特征大致比较如表 1.2 所示。

表 1.2 三种隧道结构型式基本特征比较

比较项目	分离式隧道	连拱隧道	小净距隧道
双洞最小净距	$(1.5 \sim 5) B$	0	$1 \text{ m} \sim 1.5B$
占地宽度	$(3.5 \sim 7) B$	$2B + 3 \text{ m}$	$2B + (1 \text{ m} \sim 1.5B)$
接线难度	较大	较小	较小
结构和受力	结构简单、受力稳定	结构复杂、受力不稳定	结构较简单、受力较稳定
围岩扰动次数	少	多	一般
地下空间利用	差	最好	较好
施工难度	较小	较大	中等
工程造价	M	$1.5 \sim 3M$	$1.3 \sim 2M$
质量控制难易	较易	难	中等
爆破振动控制	基本不控制	控制	控制
环境保护	山区狭窄地带可能出现高边坡	山区狭窄地带可降低边坡	山区狭窄地带可降低边坡
适用隧道长度	各种长度的隧道	短隧道	短隧道或围岩条件较好的中长隧道

从表中可见，三种结构型式各有特点：对于特长或长隧道宜采用分离式隧道，在地形狭窄、陡峭环境下修建山岭隧道或在城市建筑密集地区修建市政隧道时则可在连拱隧道和小净距隧道间进行比选。

连拱隧道位置选择自由度大，适用于地形复杂、线路布设极为困难的情况，其洞口引线占地面积小、接线难度小，若在城市区域，可大大减少拆迁工作量，降低工程费用。但从全国各地已建成工程看，连拱隧道存在明显缺陷，如结构构造和施工工序复杂、工期长、造价高、施工质量不易保证、建成后隧道普遍存在渗水和中墙开裂等质量问题。

小净距隧道结构型式介于双洞分离式隧道和连拱隧道之间，从某种意义上而言，是一种兼具两者优点的隧道布置型式：相较于分离式隧道，可更好地满足特定地质和地形条件、桥隧衔接方式，有利于公路整体线形规划和优化，在环境保护、占地等多方面优点明显；相较于连拱隧道，施工工序简单、工期短、造价低、施工质量更有保证。

1.2 隧道净距影响

和传统的隧道结构型式相比，小净距隧道最大的结构特点在于两洞之间净距小，在施工过程中两洞应力场和位移场相互影响，施工力学行为复杂。从岩体力学的角度看，岩体处于初始应力状态，由于隧道开挖，岩体应力状态发生变化，产生了二次应力，在应力的作用下围岩的弹塑性区域会发生变化。先行洞开挖施工时，后行洞围岩产生向临空面侧的拉伸变形，围岩状况恶化；后行洞开挖施工时，更是会改变先行洞已趋于稳定平衡的受力状态，产生不利影响。后行洞受力机理较为复杂：受力特征表现为，由于后行洞的开挖，先行洞洞周围岩松弛或松弛范围扩大，作用在支护结构上的荷载增加；变形特征表现为，后行洞开挖施工时，先行洞支护结构及洞周围岩向临空面拉伸，如图 1.1 所示。

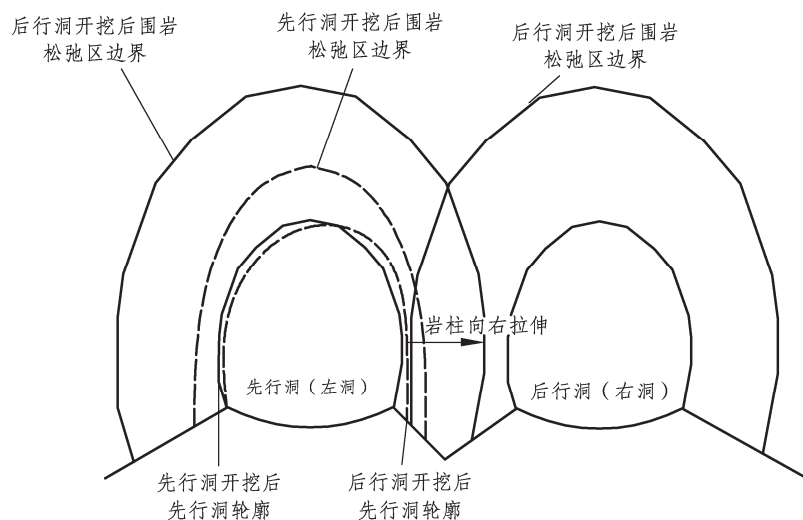


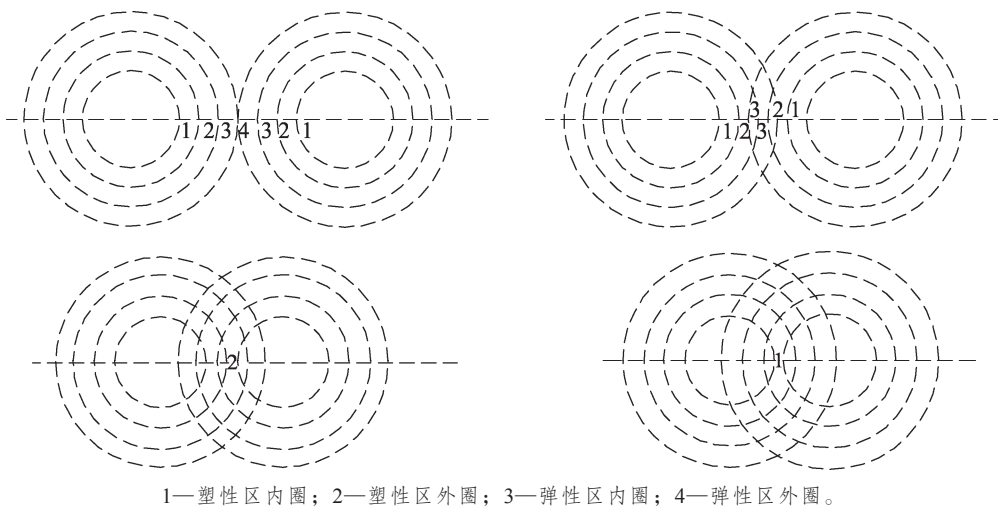
图 1.1 后行洞开挖对先行洞围岩的影响

如果双洞净距足够远，彼此都在开挖引起的应力变化影响范围以外，则一般认为双洞相互不影响。但随着双洞空间距离减小，相互间的影响范围就可能相接、相交，甚至重叠，洞

周弹塑性区域的位置关系也会发生改变，可以用以下四种空间位置关系来说明，如表 1.3 及图 1.2 所示。

表 1.3 弹塑性围岩隧道净距位置关系表

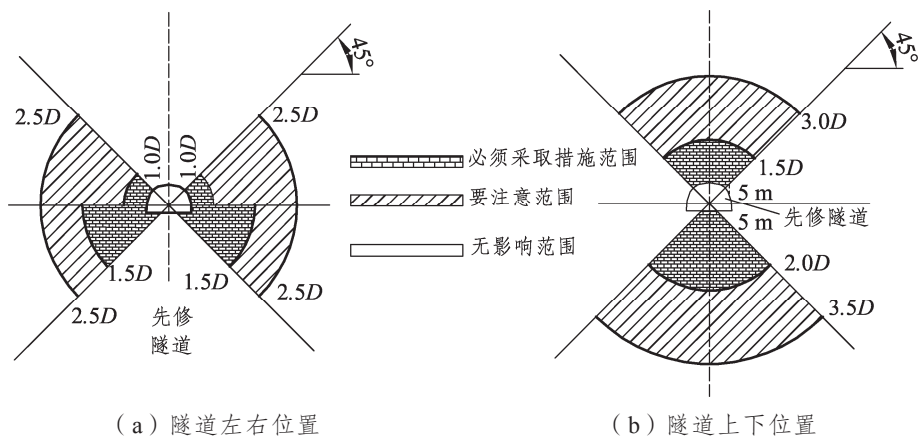
净距情况	特征	相互影响区程度	工程措施
无影响区	弹性外圈相交	弱影响	无须采取措施
弱影响区	弹性内圈相交	较小影响	需采取措施
强影响区	塑性外圈相交	稍大影响	需采取特殊措施
危害影响区	塑性内圈相交	很大影响	需采取特殊措施，应尽量避免



1—塑性区内圈；2—塑性区外圈；3—弹性区内圈；4—弹性区外圈。

图 1.2 弹塑性围岩隧道净距位置关系

针对两洞间不同净距关系所产生的近接影响，日本相关研究工作开展较早，较为系统地提出了隧洞间相互影响的划分图，如图 1.3 所示，制定了《小净距隧道施工技术指南》，列出了隧道近接影响程度及针对措施，如表 1.4 所示。



(a) 隧道左右位置

(b) 隧道上下位置

D —隧道洞径 (m)。

图 1.3 隧道相互影响示意

表 1.4 隧道影响范围分类及应采取的措施

影响程度	划分准则	措施
一般程度	基本无影响	通常不采取处治措施
要防范程度	影响较小, 不会产生危害	进行量测, 根据量测数据得出结构物的位移、变形, 与允许位移、变形比较, 决定是否采取措施
需采取措施程度	影响大, 且有害	必须进行现场量测并采取处治措施, 处治之后, 继续监测结构物的变形、位移、内力等情况

隧道不同净距决定了其近接力学行为特点和相互影响程度。相较于普通分离式隧道, 小净距隧道工程设计和施工有不同侧重之处和相应关键技术:

(1) 小净距隧道两洞间净距小, 施工过程相互影响、干扰较为明显, 设计关键环节在于确定两洞间合理净距, 既需确保工程施工安全及质量, 又需满足既定的投资、规划条件。

(2) 小净距隧道在开挖过程中, 围岩受到多次扰动, 稳定性降低, 结构失稳风险增大, 需根据两洞间净距影响程度采取有效预加固技术提高围岩强度, 增强围岩自稳能力。尤其是作为施工期间主要承载结构的中隔岩柱, 其承受的主要荷载包括中隔岩柱上方围岩荷载和左右洞施工后经初期支护传至中隔岩柱顶部的荷载。中隔岩柱一旦失稳, 将引发灾难性的后果, 必须采取合理加固技术进行加固, 以确保不出现塑性区或至少保证塑性区不至贯穿或连通。

(3) 采用钻爆法施工时, 由于中隔岩柱厚度较小, 爆破对中隔岩柱及先行洞隧道结构的稳定和受力影响严重, 必须严格控制爆破开挖振动效应, 进行针对性控制爆破设计, 采取减振措施, 优化爆破施工工艺, 选用数码电子雷管等新型材料, 将爆破对中隔岩柱及成型结构的影响降至可控范围。

(4) 针对小净距隧道结构受力特点和薄弱部位, 施工期监控量测管理体系、监控基准有相应侧重。此外, 后行洞开挖会引起地表附加沉降, 尤其是城市浅埋小净距隧道, 附加沉降可能会恶化工程建设对周边环境的影响, 需提前评估、预测地表沉降趋势及数值, 为采取相应环境控制措施提供必要支撑。

1.3 工程案例

欧洲及日本等隧道强国早在 20 世纪 70 年代就开始了小净距隧道建设。德国和希腊修建了大量的小净距隧道, 日本在第二东(京)名(古屋)、名(古屋)神(户)等重要高速公路及市政道路中设计、建设了很多小净距隧道。

国内起步相对较晚, 铁路隧道最早采用小净距隧道的结构型式, 早在 20 世纪 80 年代、90 年代就已建成了内昆线青山隧道、杨柳湾隧道、宝成复线须家河隧道、渝怀线板桃隧道等隧道。

在公路隧道方面，近年来发展较快，已建和在建的小净距隧道工程数量较多。其中，高速公路小净距隧道以紫坪铺隧道为代表，其出口端小净距段位于古滑坡体区域，隧道净距从 3.73 m 渐变到 21.86 m，小净距段落长度为 205 m。该工程的建设过程，在小净距隧道结构设计、滑坡体浅埋段沉降量测及预测、控制爆破、超前预加固等方面积累了宝贵的建设经验。城市小净距隧道以贵阳北京东路隧道和济南顺河高架玉函路隧道为典型代表。贵阳北京东路隧道位于城市核心区域，全程均为小净距洞段，两洞净距仅 4 m；洞身穿越地层以黏土、泥岩、灰岩及砂岩为主，围岩等级为 V 级，岩体破碎、节理裂隙发育；隧道埋深为 2~28 m，下穿数十栋高层建筑、工业建筑及众多地下管线，结构安全风险高，环境控制要求高。在该工程建设过程中，成功攻克了控制爆破、地表沉降控制等难题。济南顺河高架玉函路隧道位于城市主干道玉函路正下方，施工期不断道，交通流量大；除进、出口端局部为连拱隧道外，共 1 827 m 为小净距洞段，两洞间距仅 1.8~3.5 m，是世界上最长的小净距隧道；隧道地质条件极差，以黄土、黏土、全一中风化灰岩、泥岩为主，且有多处串珠状溶洞；隧道为超浅埋隧道，埋深仅 4~10 m，周边有数百栋老旧房屋，距隧道外边墙仅 1.8~3.5 m，隧顶有供水管、雨污水管、电力管线、燃气管线多处，施工期间结构安全风险极大，技术难度极高。隧道成功建成通车，在环境控制、超前预加固、非爆破开挖、地表沉降预测及控制方面取得了重大突破。这几座难度极大、风险极高的代表性隧道工程的陆续建成，标志着我国小净距隧道工程建设技术已逐渐完善、成熟。

随着各城市地铁建设如火如荼地开展，深圳、广州、南京、北京、贵阳等多个城市地铁修建中也出现了小净距隧道结构型式。广州地铁越秀公园车站、江南新村车站采用了 3 孔隧道方案，3 孔隧道最小净距仅 2.7 m；南京地铁南北线一期工程菊花台 2 号隧道出口和南北线南延支线左、右线隧道进口呈三洞平行布置，正线隧道与左右线隧道净距只有 5.27 m 和 1.69 m。

我国近十几年来开展了各种结构型式、各种地质、各种复杂环境的小净距隧道实践，沉淀了较为丰富的小净距隧道建设经验。经过这些小净距隧道的设计和施工，设计理念和参数开始稳定，施工方法开始形成体系。国内部分已建成的小净距隧道工程如表 1.5 所示。

表 1.5 国内小净距隧道工程案例

编号	隧道名称	地质状况	埋深	开挖断面	施工方法	初期支护	超前支护	净距
1	江西石师隧道	岩质较差，以砂岩、石英砂岩为主，构造裂隙、风化裂隙中夹泥较多，有软弱夹层，以 III~IV 类围岩为主			II 类围岩采用侧壁导洞法。III 类围岩深埋段采用台阶法。IV 类围岩左洞采用小导洞挖，右洞采用小导洞先行再开挖法	挂钢筋网喷射混凝土 + $\phi 22$ 普通砂浆锚杆 + I16 钢拱架	洞口段采用注浆长管棚，长度为 40 m、16 m 两种，环向间距 50 cm，注浆孔直径为 8 mm，注浆采用水泥、水玻璃双液浆液	最小净距 8.81 m
2	京福高速三明—福州段小净距隧道	II 类围岩，岩石主要为片麻状花岗岩及其风化层	30 m	宽 12.4 m	侧壁导坑法和台阶法组合	23 cm 厚 C20 喷射混凝土 + I25 钢拱架 + 锚杆		
3	福建鹤上隧道	隧道区段属剥蚀低山丘陵地貌，穿越的地层有第四系残坡积土、侏罗系上统南园组凝灰熔岩及其风化层，地层岩性单一。洞口段为 IV、V 级围岩，其余洞段为 III 级围岩。地下水主要为孔隙水和基岩裂隙水	洞口段埋深 4~10 m	单洞最大开挖跨度 16.69 m	左洞采用双侧壁导坑法由进口向出口方向开挖。右洞由出口向进口方向开挖，采用台阶法	锚杆 + 挂钢筋网喷射混凝土 + 钢拱架	进口段采用 25 m 长 $\phi 108$ 大管棚，环向间距 50 cm； $\phi 50$ 小导管， $l = 5$ m	最小净距 7.3 m
4	南京地铁 3 号线大明路车站段隧道	主要穿越地层为可塑粉质黏土、硬塑（局部可塑）黏土和粉质黏土、含砾砂质粉砂岩及强风化泥质粉砂岩	11.3~16 m	大洞宽 12 m，高 9 m；小洞宽 7.9 m，高 8 m	先施工小洞，采用台阶法；后施工大洞，预留核心土开挖 + 间隔设临时支撑			大小洞净距为 2.51 m
5	湖南炎汝高速八面山隧道	出口端地质条件较差，为粉质黏土和强风化变质砂岩，岩体较破碎			台阶法留核心土环形开挖		$\phi 108$ 大管棚	出口端左右洞线间距 16.9 m
6	大帽山扩建隧道	隧道属于构造剥蚀微丘地貌，场区表层为坡残积土，下覆侏罗系南园组凝灰熔岩、燕山早期侵入花岗岩及其风化层，隧道场区地面向里依次为 V、IV、III 和 II 级。隧道场区地下水不发育，主要为孔隙裂隙水和基岩裂隙水	最大埋深 147 m	扩建隧道最大断面面积为 255 m ²	原隧道扩建成四车道，采用单侧壁导坑法。新建四车道隧道洞口 V 级围岩采用双侧壁导坑法；IV 级围岩采用 CRD 法	湿喷 8 cm 厚钢筋纤维混凝土 + $\phi 8$ 钢筋网 + I22b 钢拱架 + $\phi 25$ 中空锚杆，分层复喷 37 cm 厚钢筋纤维混凝土		新建隧道洞口段既有隧道仅 5.89 m 和 8.83 m
7	苏州凤凰山隧道	地质条件为 V 级和 IV 级围岩。V 级围岩地层自上而下分别为碎石层、强—弱风化粉砂岩夹泥质粉砂岩	整体埋深较浅		埋深小于 7 m 洞段采用机械开挖，埋深大于 7 m 洞段采用弱爆破施工	28 cm 厚 C25 喷射混凝土 + $\phi 25$ 中空注浆锚杆 ($l = 4$ m)；环 75 cm \times 纵 50 cm) + I22b 钢拱架 (间距 50 cm) + $\phi 8$ 双层钢筋网	注浆小导管 ($l = 4.5$ m)；环 40 cm \times 纵 200 cm	

续表

编号	隧道名称	地质状况	埋深	开挖断面	施工方法	初期支护	超前支护	净距
8	华家山隧道	进洞口为V级围岩，属于弱—微风化凝灰岩，裂隙发育，较破碎	110 m		双侧壁导坑法	28 cm厚C20喷射混凝土+双层钢筋网+ $\phi 25$ 中空注浆锚杆 ($l=4$ m, 环100 cm \times 纵65 cm)	超前注浆小导管	
9	福建九曲隧道	隧道岩性单一，为云母石英砂岩。地下水主要聚集基岩裂隙中，水量不大	最大埋深54 m	宽10.74 m, 高7.08 m	V级围岩台阶法；IV级围岩左右洞超前导坑法，右洞超前导坑法		V级围岩浅埋段：超前注浆小导管，长5 m，环向间距50 cm，纵向间距3 m	
10	京福高速金旗山隧道	隧道进出口处为强—弱风化花岗岩，洞身为弱—微风化花岗岩。地下水主要源于基岩裂隙水，受大气降水补给，水量不大	46 m	净宽9.75 m, 净高5.0 m	III类围岩段采用台阶法，IV类围岩段采用全断面开挖	喷射混凝土+喷射钢筋纤维混凝土+ $\phi 25$ 中空注浆锚杆+系统锚杆+ $\phi 22$ 普通砂浆锚杆+I25钢拱架	III类围岩采用小导管注浆， $l=5$ m，环向间距80 cm，纵向间距3 m	最小净距5.08 m
11	横山隧道	洞口段围岩为坡残积土、全风化花岗岩、砂土状强风化花岗岩和碎块状强风化花岗岩。V级围岩，土体松散、岩体破碎、裂隙发育，稳定性差，易发生坍塌			原为单侧壁导坑法，后改为左右洞交错开挖，单洞留核心土台阶法开挖，初期支护加强	$\phi 25$ 中空注浆锚杆 (3.5 m长, 1 m \times 1 m) + 25 cm C25喷射混凝土+钢筋网+I25钢拱架 (间距0.7 m, 工字钢下设纵向槽钢底托梁)	采用 $\phi 108$ 大管棚 ($l=30$ m, 单液浆)加固, 小导管交错布置, 环向间距50 cm。套拱混凝土为60 cm厚C25钢筋混凝土, 基础混凝土为C15片石混凝土	
12	泉夏高速大坪山隧道	进出口端为残坡积土层—强风化花岗岩，岩体较破碎，呈碎裂状，以松散结构为主；洞身围岩以微风化花岗岩为主，节理裂隙稍发育，主要呈整体结构，局部地段为块状砌体结构。围岩级别主要以V、IV、III和II级为主			采用中部开挖超前导洞 (导洞断面尺寸为3 m \times 4 m)、大断面隧道顺序跟进的扩挖方式	26 cm厚C25喷射混凝土+ $\phi 25$ 中空注浆锚杆 ($l=4$ m, 环向间距80 cm) + I20b钢拱架	$\phi 108$ 大管棚, $\phi 50$ 小导管 (长5 m和7 m)	新建左线在既有两隧间, 净距11.28 m; 新建右线在既有右洞外侧, 净距5.28 m
13	杭州紫之隧道	岩性为薄—中厚层中—微风化泥质粉砂岩和泥岩，泥质或钙质胶结，岩体呈镶嵌块体结构，局部呈碎裂散体结构；地下水为基岩裂隙水，水量小		开挖跨度11.25 m, 高9.06 m		$\phi 25$ 锚杆 (长3 m) + I18钢拱架 (间距75 cm) + 25 cm喷射混凝土	$\phi 42$ 注浆小导管, $l=4.5$ m	主隧道与匝道交界处净距仅1.5 m

续表

编号	隧道名称	地质状况	埋深	开挖断面	施工方法	初期支护	超前支护	净距
14	三明永宁高速雷公浦隧道	隧道穿越地层为侏罗系梁山组粉砂岩和石英砂岩, 出口坍塌堆积层, 主要为坍塌积粉质黏土、强风化石英砂岩, 岩石裂隙发育, 呈碎裂结构	最大埋深 66.7 m		洞口段设计为单侧壁导坑法, 后改为预留核心土环形开挖法	锚杆(间距 80 cm) + 挂网喷射混凝土	φ108 大管棚, 40 m 长	净距仅 4 m
15	渝长高速武隆隧道	围岩以泥岩、灰岩为主, 岩层构造节理较发育, 以陡倾角节理为主, 围岩主要为 II ~ V 级, 进口段围岩以 III、IV 级围岩为主, 出口段围岩以 IV、V 级围岩为主		宽 10.5 m, 高 7 m; 开挖断面面积为 80 ~ 100 m ²	II、III 级围岩先行洞采用全断面法施工, 后行洞采用导坑法; IV、V 级围岩先行洞预留核心土环形开挖, 后行洞采用单侧壁导坑法	C20 喷射混凝土 + φ6.5 钢筋网 + φ22 砂浆锚杆或 R25N 迈式中空注浆锚杆 + I14、I18 钢筋拱架和格栅拱	超前小导管	4 ~ 12 m
16	重庆花土岗隧道	洞口强风化泥岩夹砂岩段为 V 级围岩, 洞身泥岩段、泥岩夹砂岩段为 VI 级围岩		宽 15.46 m, 高 8 m	台阶法	φ25 中空注浆锚杆(4 m) + φ8 钢筋网(20 cm × 20 cm) + 格栅拱(间距 50 cm) + 25 cm 厚 C20 喷射混凝土	注浆小导管, 4 m 长, 环向间距 30 cm, 搭接长度不小于 1 m	净距 12 m
17	沙坝湾隧道	隧道区位于四川盆地东部构造侵蚀低山区, 属于丘陵地貌。进出口地势较陡, 坡体两侧横向冲沟较发育。主要为泥岩、泥质砂岩夹砂岩; 出口段为 V 级围岩, 以泥岩为主夹砂岩	出口浅埋 1.5 ~ 7.5 m		三台阶七步法	左线: I20a 钢筋拱架(40 cm 间距) + 26 cm 喷射混凝土 + 4 m 锚脚锚管; 右线: I18 钢筋拱架(间距 40 cm) + 24 cm 喷射混凝土	φ108 大管棚(长 30 m); 拱脚 120°范围设倾角 45°的 φ42 注浆小导管(长 3.5 m, 纵 80 cm × 环 100 cm)	出口端 K120 + 500 ~ + 632 段为小净距
18	南京地铁 2 号线苜蓿园站一小卫街站区间	折返线段穿越地层主要为砂岩软弱层、中风化砂岩、中风化泥岩、微风化砂岩, 裂隙发育一较发育。地下水主要为基岩裂隙水	13.6 ~ 33.5 m		单线隧道采用台阶法; 双线隧道采用 CRD 法; 折返线右线采用 CRD 法, 左线采用上下台阶法	喷射 24 cm 厚混凝土, 格栅拱架, 钢筋网	小导管, 环向间距 30 cm	
19	石大高速瓦瓮隧道	隧道穿越岩质单一。围岩情况: V 级 140 m, IV 级 70 m, III 级 205 m			右洞为先行洞, 采用上下台阶法	I20b 钢筋拱架(间距 80 cm) + 挂网喷射混凝土 + φ28 预应力锚杆	中隔岩柱采用 φ42 超前小导管注浆, l = 3.5 m, 搭接长度 1 m, 间距 40 cm	
20	新城子隧道	洞身穿越地层主要为砾岩夹砂岩、泥岩、板岩夹砂岩、灰岩、断层角砾和碎裂岩	最大埋深 749 m		三台阶开挖法	双层初支。第一层: 26 cm 厚喷射混凝土 + 钢筋网 + 锚脚锚杆(长 6 m, 纵间距 60 cm) + I22b 钢筋拱架(间距 60 cm)。第二层: 21 cm 喷射厚混凝土 + 钢筋网 + 锚脚小导管(长 4.5 m, 纵间距 60 cm) + I18 钢筋拱架(间距 60 cm)		最小净距为 5 ~ 6 m

续表

编号	隧道名称	地质状况	埋深	开挖断面	施工方法	初期支护	超前支护	净距
21	都汶高速 紫坪铺 隧道	出口端小净距段工程地质处于 II 类围岩地段，以碎块状镶嵌结构或碎石状压碎结构为主，属于较破碎软弱围岩，岩层以泥岩为主，夹炭质泥岩及粉砂岩	出口段埋深为 5.4~45.6 m		台阶法	锚网喷+I18 钢拱架	左洞：φ108 大管棚，30 m 长，环向间距 40 cm； 右洞：双排 φ42 注浆小导管，6 m 长，环向间距 40 cm，排距 20 cm，搭接长度 3 m	出口段为小净距段，净距 3.73~21.86 m
22	京福高速 南洲 I 号 隧道	隧道围岩上部为残坡积层，下部为片麻状花岗岩及其风化层。无区域性断裂，岩层为层状、块状结构，局部破碎。围岩主要由 III、IV、V 级围岩组成	平均埋深 21 m	宽 10.84 m， 高 6.85 m	V 级围岩、IV 级围岩采用台阶法；III 级围岩采用全断面法	23 cm 厚 C25 喷射钢筋混凝土纤维混凝土+φ25 中空注浆锚杆(80 cm×80 cm)+I25 钢拱架(间距 80 cm)或格棚拱	大管棚、小导管	中隔岩柱厚度最小为 4.87 m
23	三明市曾 家顶隧道	隧道下伏基岩为侏罗系潭平组粉砂岩、细砂岩，中段为弱风化层，结构较稳定；两洞口处于全、强风化层，结构破碎松散，稳定性较差；地下水为孔隙裂隙水及基岩裂隙水	最大埋深 55 m		洞口 V 级围岩段； 三台阶法和留核心土环形开挖相结；IV 级围岩：台阶法	锚杆+挂网湿喷混凝土+钢拱架	大管棚、超前注浆小导管、超前锚杆	中隔岩柱厚度 5~7 m
24	重庆轨道 三号线新 牌坊—郑 家院子 区间	隧道穿越岩层自上而下分别有 IV 级回填土层、V 级、IV 级泥岩层及 III 级砂岩层，地下水较少	埋深 5~22 m	单洞开挖宽度为 7.7 m	VI、V、IV、III 级不同围岩段分别采用三台阶法、两台阶预留核心土法、两台阶全断面开挖法		洞口回填土层浅埋地段采用 30 m 超前大管棚加固	中隔岩柱厚度 5.8 m
25	三福高速 联南隧道	进、出口 100 m 段属 II 类围岩，主要由强风化凝灰熔岩及残积黏性土组成，强度低，易发生坍塌、冒顶；其余地段属于 III、IV 类围岩，主要由弱风化凝灰熔岩组成，岩质坚硬，节理裂隙较发育，完整性较差。地下水类型主要为孔隙水及基岩裂隙水	最大埋深 145 m	隧道单洞最大开挖宽度 12.5 m	II 类围岩先行洞采用短台阶法，后行洞采用侧壁导坑法；III 类围岩采用短台阶法；IV 类围岩采用台阶法	II、III 类围岩：钢拱架+径向预应力中空注浆锚杆+钢筋网+喷射混凝土；IV 类围岩：径向普通砂浆锚杆+钢筋网+喷射混凝土	长管棚+超前注浆小导管+超前锚杆	最小净距 5 m
26	福建魁岐 2 号隧道	洞身围岩以微风化花岗岩为主，围岩级别为 III~II 级；进出口的围岩以强、弱风化花岗岩为主，围岩级别为 IV~V 级	洞口浅埋段 6~13 m	宽 17.87 m， 高 12.84 m	进口段采用 CRD 法。V、IV 和 III 级围岩分别采用 CRD 法、弧形导坑预留核心土法和台阶法	第一层 25 cm 厚 C25 喷射混凝土+第二层 20 cm 厚 C25 喷射混凝土+φ22 锚杆(长 4.5 m，环 100 cm×纵 60 cm)+双层钢筋网	V 级围岩段中隔岩柱采用小导管(φ50, l=7.5 m)注浆加固	中隔岩柱厚度 11.7~15.3 m

续表

编号	隧道名称	地质状况	埋深	开挖断面	施工方法	初期支护	超前支护	净距
27	重庆市轨道交通六号线礼嘉车站	区域表层为素填土、粉质黏土，层厚 0.5~5 m；下伏沙溪庙组砂岩、泥质砂岩与砂质泥岩，岩体裂隙不发育一较发育，呈整体块状结构；围岩级别为 III、IV 级		单洞最大开挖面积 427 m ² ，宽 23.2 m，高 18.5 m	双侧壁导坑法	双层格栅钢拱架 + $\phi 8$ 双层钢筋网 + 喷射混凝土 + $\phi 25$ 中空注浆锚杆， $(l=4.5\text{ m}, \text{纵} 80\text{ cm} \times \text{环} 100\text{ cm})$	$\phi 158$ 大管棚 (长 40 m, 环向间距 40 cm) + $\phi 42$ 超前小导管 ($l=4.5\text{ m}$)	中隔岩柱厚 6.5~6.9 m
28	南京韩府山隧道 (1#、2#、3#、4#隧道均为小净距隧道)	1#、2#、3#隧道洞身为 IV、V 级软弱围岩，4#隧道洞身为 III、IV、V 级围岩。隧道埋深浅，最大埋深仅 60 m，进出口均位于浅埋偏压地段，隧道围岩以 IV、V 级软弱围岩为主。隧道范围地下水主要为基岩 (裂隙) 水，地下水不发育	最小埋深 1.3 m，最大埋深 60 m	开挖断面面积均大于 130 m ² ，最大断面面积为 153 m ²	IV 级围岩条件下进洞采用三台阶七步法，V 级围岩进洞 (土质和强风化石质) 采用 CRD 法	IV 级围岩：喷射混凝土厚 25 cm + 钢筋网 (20 cm \times 20 cm) + 系统锚杆 (长 3.5 m, 纵 1.2 m \times 环 1.2 m) + 118 钢拱架 (间距 0.8 m); V 级围岩：喷射混凝土厚 28 cm + 钢筋网 (20 cm \times 20 cm) + 系统锚杆 (长 4 m, 纵 1.2 m \times 环 1 m) + 120a 钢拱架 (间距 0.6 m)	进、出口浅埋地段拱部 140° 范围内设 $\phi 108$ 超前长管棚，长 20~40 m，环向间距 40 cm; 3.5 m 长 $\phi 42$ 超前小导管，纵向间距 1.5 m	净距 6~10 m
29	长沙浏阳河隧道	围岩为 V 级，为遇水易崩解的强风化软砾岩，围岩稳定性差			台阶法	钢拱架 + 30 cm 厚 C25 网喷混凝土 + 锚杆	全断面预注浆 + 管棚 + 小导管	7.68~23.38 m
30	排头隧道	基岩主要为片麻岩，岩体破碎，构造发育。进出口段均为 V 级围岩，中部为 IV 级围岩，偏压较严重			V 级围岩：先行洞留核心土环形开挖，后行洞侧壁导坑法。IV 级围岩：先行洞短台阶法，后行洞短台阶 + 留核心土环形开挖	厚 25 cm 喷射混凝土 + 锚杆 ($l=3.5\text{ m}, \text{纵} 50\text{ cm} \times \text{环} 100\text{ cm}$)		龙泉端最小净距 9.86 m; 靖城端最小净距 6.14 m
31	普宣高速法马坡隧道	地层主要为第四系全新统杂填土、第四系全新统残坡积黏土及二叠系上统宣威组页岩夹砂岩、薄层煤层。存在的主要不良地质为老窑采空区。左右线洞身 IV 级围岩共 524.35 m; V 级围岩共 156 m	隧道最大埋深 38 m	开挖跨度为 13 m; 开挖断面面积为 106~113 m ²	洞口 V 级围岩浅埋段采用三台阶七步法; 隧道 IV 级围岩采用留核心土环形开挖法	24 cm 厚 C20 喷射混凝土	大管棚、小导管	中隔岩柱厚 1.28~2.63 m
32	六潜高速转步园隧道	岩性主要为薄层状石英英岩及白云石英片岩，少量片麻岩。中间穿越一条断层，节理裂隙较发育，围岩易坍塌。围岩级别分别有 V 级、IV 级、III 级	洞口埋深 25~30 m	开挖跨度 12.40 m	单侧壁导坑法	28 cm 厚 C25 喷射混凝土 + $\phi 25$ 中空注浆锚杆 (长 4 m)。中隔岩柱: 25 cm 厚 C25 喷射混凝土 + $\phi 25$ 水平对拉预应力中空注浆锚杆	$\phi 108$ 大管棚, $l=35\text{ m}$, 环向间距 40 cm	5.58 m

续表

编号	隧道名称	地质状况	埋深	开挖断面	施工方法	初期支护	超前支护	净距
33	永武高速 横山隧道	围岩级别为V级，以残坡积土、砂土、碎块状强风化石英砂岩、千枚岩为主，岩体较破碎，节理裂隙较发育	洞口埋深10~20m	开挖跨度12.40m	台阶法留核心土环形开挖	28cm厚C25喷射混凝土+ $\phi 25$ 中空注浆锚杆($l=4m, 80cm \times 80cm$)。中隔岩柱: 28cm厚C25喷射混凝土+ $\phi 50$ 注浆小导管($l=5m$)	$\phi 108$ 注浆大管棚, $l=35m$, 环向间距50cm	
34	浙江石鼓 岭隧道	以砂岩和凝灰岩为主, 节理裂隙发育。围岩级别以IV~V级围岩为主。地下水主要为基岩裂隙水		宽14.5m, 最大开挖断面面积为166m ²	洞口V级围岩采用双侧壁导坑法; 洞身V级围岩先行洞采用留核心土环形开挖, 后行洞采用中隔壁法; IV级围岩先行洞采用中隔壁法、后行洞采用中隔壁法; III级围岩先行洞采用全断面法, 后行洞采用台阶法	V级围岩段: 中隔岩柱采用 $\phi 42$ 注浆小导管($l=6m$, 洞口间距纵距0.75m \times 环1m)。IV级、III级围岩段: 中隔岩柱 $\phi 25$ 注浆锚杆($l=4.5m$, 纵向间距4m)	进洞段采用 $\phi 108$ 长管棚	中隔岩柱厚9.84~10.4m
35	深圳地铁5 号线大治 区区间	穿越微风化地层, 岩质坚硬, 节理较发育, 岩石较破碎, 为IV级围岩。地下水为基岩裂隙水			台阶法	格栅拱架间距75cm+20cm厚C25喷射混凝土	$\phi 42$ 小导管, 长3m, 环向间距33cm, 纵向间距1.5m	净距由0.32m增至2.5m
36	贵阳北京 东路隧道	洞身通过地段围岩级别全部为V级围岩, 地质主要为强风化页岩、泥岩和泥质灰岩, 遇水易软化, 地下水发育	埋深5.4~19m	面积为171m ²	岩质段: 预留核心土环形开挖。土质段: CRD法	喷射混凝土+钢拱架+锚杆		净距4m
37	河源洞 隧道	洞口段为亚黏土、全—强风化石英闪长岩, 围岩稳定性差, 属于V级浅埋软弱围岩	40m	宽10.9m, 高8.59m	洞口段采用短台阶机械配合人工开挖; V级围岩采用侧壁导坑法和CRD法; IV级围岩采用台阶法	V级围岩: 22cm厚C20喷射混凝土+ $\phi 22$ 锚杆($l=3m$, 纵80cm \times 环120cm); VI级围岩: 25cm厚C20喷射混凝土+ $\phi 25$ 中空注浆锚杆($l=3m$, 纵50cm \times 环120cm)	$\phi 108$ 大管棚, 进口端长30m; 出口端左洞长30m, 右洞长24m	12m
38	渝怀铁路 板桃隧道	洞身穿过页岩夹砂岩岩层, 岩层呈黄灰色薄层, 泥质胶结, 质软, 遇水成泥, 属严重风化带地层。围岩自稳能力较差, 主要以V级、IV级围岩为主		I线、II线隧道开挖跨度均为8.26m	微台阶法	25cm厚喷射混凝土+钢筋网($\phi 8$ 钢筋, 15cm \times 15cm)+格栅钢拱架(间距为1~1.2m)	注浆小导管, $l=3.5m$, 环0.5cm \times 纵2m	净距为6.14m

续表

编号	隧道名称	地质状况	埋深	开挖断面	施工方法	初期支护	超前支护	净距
39	重庆市渝中连接隧道	围岩以中风化砂质泥岩为主，围岩级别为Ⅳ级	最深埋深 5.6 m		左洞采用中隔壁法施工，右洞采用台阶法留核心土环形开挖	喷射混凝土 + I18 钢筋拱架 (间距 50 cm) + $\phi 22$ 砂浆锚杆 (纵 1 m \times 环 1 m, $l=3.5$ m)		最小净距为 4.2 m
40	河南太阳山隧道	隧址区地貌属于褶皱侵蚀低山		宽 14.0 m, 高 8.8 m	单侧壁导坑法	I18 钢筋拱架 (间距 75 cm) + $\phi 8$ 钢筋网 + $\phi 25$ 锚杆 (长 4 m, 纵 75 cm \times 环 100 cm)	左洞出口采用 $\phi 108$ 大管棚, 右洞出口采用 $\phi 89$ 大管棚, 环向间距 50 cm; 小导管注浆加固, 长 5.0 m	中隔岩柱厚 6.3 ~ 8.5 m
41	瑞赣高速九岭隧道	洞口段为 V 级围岩, 岩性为强风化砂质板岩, 厚 15 ~ 20 m; 洞身围岩主要为 III ~ IV 级围岩, 岩性为弱风化砂质板岩, 节理裂隙较发育, 开挖后洞室稳定性差; 围岩分类情况为: III 级围岩 227 m, IV 级围岩 557.55 m, V 级围岩 268 m	最大埋深 76 m	宽 10.75 m	IV 级、V 级围岩段采用单侧壁导坑法, III 级围岩采用短台阶法	IV 级围岩: $\phi 22$ 锚杆 (环 80 cm \times 纵 60 cm, 长 4 m) + 双层 $\phi 6$ 钢筋网 + 25 cm 厚 C25 喷射混凝土 + I18 钢筋拱架 (60 cm)	$\phi 42$ 超前小导管注浆加固, 长 5 m	净距为 9.6 m
42	银武线十堰—漫川关高速花园隧道	十堰端洞口段, 地形偏压, 表层第四系覆盖层较厚, 主要穿越地层为强风化白云岩, 围岩类别为 II 类			先行洞采用台阶法, 后行洞采用侧壁导坑法	系统锚杆 (长 3 ~ 4 m) + $\phi 25$ 中空注浆锚杆 + 钢筋网 + 26 cm 厚喷射混凝土 + I18 钢筋拱架 (纵向间距 75 cm)		净距 1.8 ~ 3 m
43	重庆轨道交通环线渝鲁站	渝鲁站以砂质泥岩为主, 夹薄层至中厚层砂岩。出露的地层由上而下依次为第四系全新统填土层、残坡积层和侏罗系中统沙溪庙组沉积岩层	16.9 ~ 25.4 m	左洞宽 12.36 m, 高 9.66 m; 右洞宽 6.7 m, 高 6.7 m	左洞 (小洞) 采用台阶法, 右洞 (大洞) 采用 CD 法			YK30 + 666 ~ + 857 为小净距隧道, 左右线中心距 10.8 m
44	重庆岚峰隧道	隧道地处龙王洞背斜西翼, 属侵蚀低山丘陵地貌。隧道地质围岩分类情况为 III 类围岩 110 m、IV 类围岩 800 m		宽 16 m, 高 9.2 m	III 类围岩: 采用单侧壁导坑法开挖; IV 类围岩: 左洞采用全断面开挖, 右洞采用短台阶法	III 类围岩: 4 ~ 6 cm 初喷混凝土 + I20b 钢筋拱架 + 双层 $\phi 8$ 钢筋网 + 复喷 20 cm 厚 C20 混凝土; IV 类围岩: 4 ~ 6 cm 初喷混凝土 + 双层 $\phi 8$ 钢筋网 + I18 钢筋拱架 + 复喷 15 cm 厚 C20 混凝土	III 类围岩: 超前锚杆, R25N 迈式中空注浆锚杆, 间距为 40 cm	中隔岩柱厚 6.5 m

续表

编号	隧道名称	地质状况	埋深	开挖断面	施工方法	初期支护	超前支护	净距
45	王家里隧道	围岩主要由第四系中更新统离石厚层状黄土组成, 岩性为粉土, 发育垂直节理, 总体呈块状整体结构, 进出口段呈松软结构	最大埋深 74 m	宽 10.25 m, 高 5 m	V 级围岩浅埋段采用单侧壁导坑法; V 级围岩深埋段采用台阶留核心土开挖; IV 级围岩采用台阶法	IV 级围岩: 22 cm 厚 C25 喷射混凝土 + $\phi 22$ 锚杆 + $\phi 8$ 钢筋网 + 拱墙 I16 钢筋架 (间距 1 m); V 级围岩深埋段: 26 cm 厚 C25 喷射混凝土 + $\phi 25$ 锚杆 + $\phi 8$ 钢筋网 + 拱墙 I20a + 仰拱 I18 钢筋架 (间距 80 cm); V 级围岩浅埋段: 26 cm 厚 C25 喷射混凝土 + $\phi 25$ 锚杆 + $\phi 8$ 双层钢筋网 + 拱墙 I20a + 仰拱 I18 钢筋架 (间距 70 cm)	$\phi 50$ 注浆小导管, 长 4.5 m, 环向间距 30 cm, 纵向搭接长度 3 m	净距 7 ~ 10 m
46	岳潜高速公路巴掌湾隧道	隧道属典型的浅埋偏压隧道。洞口段为 V 级围岩, 由全一强风化花岗岩片麻岩组成, 全风化花岗岩呈砂状, 结构松散; 强风化花岗岩片麻岩, 裂隙极发育, 岩体破碎。左右洞进口端为 V 级围岩浅埋段	左右洞最浅埋深 1.6 m 和 0.7 m	宽 10.5 m, 高 7 m	台阶法	$\phi 6$ 钢筋网 + I20a 钢筋架 (间距 50 cm) + 喷射 C25 混凝土厚 25 cm + $\phi 25$ 中空注浆锚杆 (拱墙, $l=4$ m; 中隔岩柱, $l=6$ m; 环 100 cm \times 纵 50 cm)		中隔岩柱厚度 17.8 m
47	南京地铁 2 号线区间折返线段	洞身处于中风化砂岩、微风化砂岩中, 裂隙较发育。地下水主要有孔隙潜水 and 基岩裂隙水。地质条件比较差, 围岩级别为 V 级		左洞高 6.4 m, 宽 6.28 m; 右洞高 8.58 m, 宽 12.2 m	左洞采用台阶法, 右洞采 CRD 法	25/30 cm 厚 C20 喷射混凝土 + $\phi 6.5$ 双层钢筋网 + 格栅钢筋架 (间距 50 cm)	拱部 150° 范围设 $\phi 42$ 超前注浆小导管, 长 3 m, 环向间距为 30 cm, 纵向间距为 1 m	中隔岩柱厚度 3.09 ~ 5.8 m
48	武西高速桃花岭隧道	隧道地层为第四系上更新统风积形成的马兰黄土, 结构松散, 强度较弱, 工程性质差, V 级围岩。洞身为具有一定湿陷性的新黄土, 土质较松散, 稳定性差, 承载力低。黄土湿陷等级为 II ~ III 级		最大跨度 15.3 m, 高 12 m	CRD 法	格栅拱架 (纵向净距 50 cm, 每榀均设置 $\phi 50$ 锁脚锚管, 长 3.5 m) + $\phi 8$ 双层钢筋网 + 喷射 37 cm 厚 C30 混凝土	$\phi 50$ 超前小导管, 环向间距 40 cm	最小净距 4.45 m
49	南充西山隧道	隧道以泥岩、砂岩为主, 岩层近于水平, 局部存在小扭曲、褶皱现象。泥岩遇水软化, 失水开裂, 围岩以 IV ~ V 级围岩为主	最大埋深 95 m		净距小于 5 m 的 V 级围岩地段采用双侧壁导坑法开挖, 其余 V 级围岩段采用中隔壁法开挖。IV 级围岩段采用台阶法	挂钢筋网 + 喷射纤维混凝土 + 中空注浆锚杆 + 砂浆锚杆 + 钢筋架 + 水平对拉锚杆	$\phi 127$ 大管棚, 环向间距 40 cm, 进口端长 25 m, 出口端长 40 m。 $\phi 42$ 小导管, 间距 15 cm	最小净距 4 m

续表

编号	隧道名称	地质状况	埋深	开挖断面	施工方法	初期支护	超前支护	净距
50	宁德至武夷山高速洋庄隧道	V级围岩长 32 m, 由残坡积亚黏土、强—弱风化凝灰熔岩组成, 岩体破碎, 松散结构。IV级围岩长 30 m, 由弱风化凝灰熔岩组成, 节理裂隙发育, 岩体较破碎。III级围岩长 75 m, 由弱风化凝灰熔岩组成, 节理裂隙较发育, 岩体较完整, 块状结构	埋深 5~34 m		IV、V、VI级围岩采用单侧壁导坑法, I、II、III级围岩采用超前导坑预留光面层钻爆法		拱部 140°范围内设φ108管棚, l=20 m, 环向间距 30 cm	净距 5.4~7 m
51	莲花隧道	围岩主要为侏罗系中统沙溪庙组的粉砂岩与砂岩	小净距段埋深仅为 4.5~20 m	高 8 m, 宽 13.4 m	台阶法	φ25 中空注浆系统锚杆(长 4 m, 环 80 cm×纵 80 cm)+φ6.5 钢筋网(20×20 cm)+I18 钢拱架(纵向间距 80 cm)+24 cm厚 C25 喷射混凝土	拱部超前注浆小导管	净距由 9 m 增大至 20 m
52	福州螺洲大桥南接线隧道			单洞开挖断面宽度 19.55 m	CD 法	锚杆+挂钢筋网湿喷混凝土+钢拱架。V级围岩采用两次初支(第一次喷 26 cm, 第二次喷 16 cm)	大管棚(进出洞各 40 m)、小导管(V级围岩)	净距 14.15 m
53	大连地铁河口站后折返线与地铁三号线并行段	洞身主要穿越震旦系长岭子组中风化板岩, 局部穿越震旦系长岭子组强风化板岩	埋深 9.3~10.7 m	宽 11.9 m, 高 9.7 m	CRD 法	C25 喷射混凝土+格栅拱架(格栅间距 0.5 m)+双层钢筋网	拱顶 120°范围采用φ42小导管超前支护, 长 2.5 m, 环向间距 30 cm, 纵向间距 1 m	
54	陕西黄柏楼二号隧道	洞身穿越弱风化千枚岩, 主要以绢云石英千枚岩为主, 局部夹炭质千枚岩, 节理不发育, 薄层状结构	最大埋深 63 m	左洞: 宽 13.75 m, 高 5 m。 右洞: 宽 10.25 m, 高 5 m	左线隧道洞口段、V级围岩采用双侧壁导坑法, 右侧隧道V级围岩采用单侧壁导坑开挖; IV级围岩采用单侧壁导坑法, III级围岩采用台阶法	径向系统锚杆+钢筋网+钢拱架+钢筋网	洞口段围岩、V级围岩和IV级围岩采用φ108大管棚预加固; 采用φ50小导管注浆和水平对拉锚杆加固中隔岩柱	净距 4.5~8.5 m
55	重庆马嘴隧道	地层由上覆粉质黏土夹碎石块和下伏页岩和石灰岩组成	最大埋深 441 m	净跨 11.74 m, 高 8.8 m	CD 法	系统锚杆+喷射混凝土+钢筋网+钢拱架+锁脚锚管	φ108大管棚, l=30 m, 环向间距 40 cm; φ42小导管, 长 3.5 m, 环向间距 40 cm	最小净距 7.5 m

续表

编号	隧道名称	地质状况	埋深	开挖断面	施工方法	初期支护	超前支护	净距
56	连云港北固山隧道	进口为斜坡地形，表层为残坡积粉质黏土夹块石，洞身位于残坡积土层和全一强风化云母片岩中，岩体呈松散结构	最大埋深 110 m		双侧壁导坑法	$\phi 25$ 中空注浆锚杆[纵 60 cm × 环 75 cm, 长 4 m (中隔岩柱侧为 5 m)] + 双层 $\phi 8$ 钢筋网 + 122b 钢筋拱架 (纵向间距为 60 cm) + 28 cm 厚 C20 喷射混凝土	超前支护 大断面采用 $\phi 108$ 管棚、 $\phi 42$ 超前注浆小导管	净距 左右洞净距最小约为 10 m
57	长沙地铁 2 号线荣湾镇停车区间	杂填土、粉质黏土、断层角砾岩、强风化板岩、中风化板岩		C 断面跨度最大，为 14.4 m	A、B、C 三种不同断面分别采用台阶法、CRD 法、双侧壁导坑法	$\phi 42$ 注浆锚管 (边墙布置) + 双层 $\phi 8$ 钢筋网 + 格栅钢拱架 + C25 喷射早强混凝土		C 断面与右线隧道中隔岩柱厚 0.63 ~ 1.65 m
58	十(堰)天(水)高速神河 1 号隧道	围岩主要为强风化硅质板岩及中风化炭硅质板岩，顶部少量碎石，强风化板岩节理裂隙发育，岩体破碎，自稳能力差。地下水主要为基岩中的裂隙水		宽 11.25 m, 高 5.2 m		$\phi 25$ 中空注浆锚杆 ($l=4$ m) + 双层 $\phi 8$ 钢筋网 + 型钢拱架 (间距 60 cm) + 28 cm 厚 C25 喷射混凝土	拱部 $\phi 50$ 小导管 ($l=4$ m, 环向间距 30 cm); 边墙 $\phi 50$ 小导管 ($l=4.5$ m, 环向间距 100 cm)	最小净距为 12 m
59	福州烟台山隧道	隧道穿越 1 条断层带、3 条辉绿岩岩脉及 11 条节理裂隙密集带; 洞口段围岩级别为 V 级、局部偏压, 围岩软弱、破碎、完整性差, 局部伴有基岩裂隙水		单洞断面面积为 244.85 m ²	三台阶七步法		V 级围岩采用 40 m 长管棚。 $\phi 42$ 超前小导管, $l=3.5$ m, 纵向间距 2 m	进出口净距 5.6 ~ 7.3 m
60	西安地铁 5 号线兴庆路站至青龙寺站区间	本区间断面非对称小净距隧道穿越的土层主要有第四系全新统人工填土、第四系上更新统新黄土、第四系中更新统老黄土及粉质黏土等		左洞宽 13.5 m; 高 10.4 m; 右洞宽 6.28 m, 高 6.67 m	左线: 双侧壁导坑法。右线: 上下台阶法。留核心土环形开挖法	左洞: C25 喷射混凝土厚 35 cm + 格栅钢拱架 (间距 50 cm)。右洞: C25 喷射混凝土厚 25 cm + 格栅钢拱架 (间距 50 cm)	左洞: $\phi 108$ 大管棚 ($l=30$ m) + $\phi 42$ 小导管 ($l=3$ m); 右洞: $\phi 42$ 小导管 ($l=3$ m)	
61	浙江道冠山隧道	围岩为砂岩、石英砂岩, 岩石节理裂隙普遍发育, 节理面以平直为主, 地下水水量小, 主要为基岩裂隙水, 水文地质条件较简单		开挖跨度在 10 m 以上	V 级围岩采用单侧壁导坑法; VI 级围岩采用台阶法与正向侧壁导坑组合法; III 级围岩采用全断面与超前导坑预留光爆层法		小导管	出口端 V 级围岩段 400 m 范围净距仅 6 m

续表

编号	隧道名称	地质状况	埋深	开挖断面	施工方法	初期支护	超前支护	净距
62	乌鲁木齐雅理里克山隧道	隧道出入口处, 地形较陡, 表层为含砾黄土状粉土、角砾, 下伏芦草沟组含粉砂质泥灰岩、砂岩, 岩石属较软岩—较软岩, 岩体完整性为破碎—较破碎, 围岩级别为 V 级, 水文条件主要为山坡面流, 汇水面积不集中		总跨度 21.64 m, 高 8.34 m, 单洞断面面积为 67.5 m ²	三导洞法	正洞: 30 cm 厚 C25 喷射混凝土 + $\phi 25$ 中空注浆锚杆 (4 m 长) + $\phi 8$ 钢筋网 + I20a 钢拱架 (60 cm)。中导洞: 20 cm 厚 C25 喷射混凝土 + $\phi 22$ 砂浆锚杆 (2.5 m 长) + $\phi 8$ 钢筋网 + II6a 钢拱架 (60 cm)	$\phi 42$ 小导管 (3.5 m 长)	净距最小约 14 m
63	上海小洋山隧道	基岩岩性为花岗岩, 地质围岩划分为 II、III、IV 级			侧线采用单线单导坑法, 辅道右线采用 CD (或 CRD) 法	钢支撑 + 锚杆 + 钢筋网 + 喷射混凝土		最小净距 6.51 ~ 6.71 m
64	大岭头隧道	主要由花岗岩构成		最大开挖净宽为 16.17 m	洞 V 级围岩采用正台阶法; 后行洞 V 级围岩采用双导坑法, IV 级围岩采用 CD 法	洞 V 级围岩段: 28 cm 厚 C25 喷射混凝土 + I22a 钢拱架 (纵向间距 50 cm) + 双层 $\phi 6.5$ 钢筋网 + $\phi 25$ 中空注浆锚杆 ($l = 4$ m, 环 100 cm \times 纵 50 cm)。IV 级围岩段: 26 cm 厚 C25 喷射混凝土 + I20b 钢拱架 (纵向间距 60 cm) + 单层 $\phi 6.5$ 钢筋网 + $\phi 25$ 中空注浆锚杆 ($l = 3.5$ m, 环 100 cm \times 纵 60 cm)	洞 V 级围岩段: $\phi 108$ 大管棚 (环向间距 40 cm)。IV 级围岩段: 长 3.5 m 的 $\phi 42$ 小导管 (环向间距 40 cm, 纵向间距 2.4 m, 每排小导管纵向搭接不小于 1 m)	中隔岩柱最小厚度为 3.49 m
65	厦门环岛干道厦大隧道	浅埋暗挖段地质主要为填土层、砂层、亚黏土层, 以亚黏土层为隔水层, 填土层、砂层为主要含水 (透) 水层。隧道进口位于狮子坡角海沟处, 地下水丰富。围岩级别为 III ~ V 级	6 m		CRD 法		$\phi 127$ 大管棚 (长 80 m, 环向间距 40 cm); $\phi 45$ 小导管 (环向间距 40 cm, 长 3.5 m, 纵向间距 2 m)	隧道间距 7.04 ~ 3.44 m
66	汝楠高速黄毛岭隧道	上部覆盖层厚 5 ~ 30 m, 为亚黏土, 含碎石亚黏土, 下伏基岩为震旦系中粗粒变质砂岩, 局部夹板岩, 强风化为主, 属较软岩类		主洞净宽为 10.25 m, 净高 5 m	CD 法	$\phi 25$ 中空注浆锚杆 ($l = 3$ m, 5 m, 纵 50 cm \times 环 100 cm) + 双层 $\phi 8$ 钢筋网 + I18 钢拱架 (纵向间距 50 cm) + 25 cm 厚 C20 喷射混凝土	$\phi 42$ 小导管, $l = 4.5$ m, 环 60 cm \times 纵 100 cm	左右洞间距 8 ~ 20 m

续表

编号	隧道名称	地质状况	埋深	开挖断面	施工方法	初期支护	超前支护	净距
67	焦树山隧道	覆盖层由第四系填筑土、坡积粉质黏土、残积砾质黏土等组成，基底由燕山期花岗岩及其风化层组成。围岩级别为Ⅲ~Ⅴ级。地下水主要为基岩裂隙水	最大埋深 90 m	高 8.94 m，宽 18.9 m	洞身段Ⅱ级围岩采用上下台阶法，Ⅲ级围岩采用环形开挖留核心土法，Ⅳ、Ⅴ级围岩段采用双侧壁导坑法	Ⅱ级围岩：10 cm 厚 C25 喷锚纤维混凝土 + $\phi 22$ 锚杆 (3 m，中隔岩柱 5 m，纵 1.5 m \times 环 1.5 m)；Ⅲ级围岩：24 cm 厚 C25 喷锚纤维混凝土 + $\phi 22$ 锚杆 (3.5 m，中隔岩柱 5.5 m，纵 1 m \times 环 1.2 m) + 118 钢拱架 (间距 1 m)；Ⅳ级围岩：26 cm 厚 C25 喷锚纤维混凝土 + $\phi 25$ 中注式和自进式锚杆 (4.5 m，中隔岩柱 6.5 m，纵 1 m \times 环 1 m) + I20 钢拱架 (间距 1 m)；Ⅴ级围岩：30 cm 厚 C25 喷锚纤维混凝土 + $\phi 25$ 中注式和自进式锚杆 (4.5 m，中隔岩柱 7.5 m，纵 0.75 m \times 环 1 m) + I20 钢拱架 (间距 75 cm)	超前段采用 $\phi 50$ 小导管，其余洞段 $\phi 22$ 早强砂浆锚杆 小导管 中隔岩柱采用 3 m 长锚杆水平加固；拱部设超前注浆锚杆 (长 5 m，纵 4 m \times 环 0.6 m)	左右线间距最大为 22.3 m，最小为 18.5 m
68	浙江招宝山隧道	隧道围岩属Ⅲ类 (98.9 m) 和Ⅳ类 (70.1 m)，为中等和微风化的流纹斑岩，质地致密坚硬，岩层有较发育的节理和裂隙。隧道通过地段受 3 条断层带的影响，并有两条明显的软弱岩体带	最大埋深 30 m	隧道开挖断面净宽 14.15 m，高 12.36 m	台阶法	喷、锚、网、格栅拱架		净距由 4 m 逐步缩小到 2.98 m
69	陕西长哨隧道	填土、强风化千枚岩、弱风化千枚岩；洞身围岩级别为Ⅳ~Ⅴ级		宽 12 m，高 11 m	台阶法	I20a 钢拱架 (间距 70 cm) + 26 cm 厚喷射 C25 混凝土	浅埋段采用 $\phi 50$ 小导管，其余洞段 $\phi 22$ 早强砂浆锚杆	净距 7.5 m
70	重庆艾坪山隧道	洞身位于泥质、砂质碎屑岩分布区，岩性以软岩为主	最大埋深 160 m	宽 10.54 m，高 7 m	浅埋小净距段采用 CD 法	锚杆 + 喷射混凝土 + 钢筋网 + 钢支撑	小导管	
71	内昆线青山隧道	出口端小净距段为砂岩、粉砂岩、页岩，肩部夹泥灰岩，岩层走向与线路近于正交，倾角 64° ，为Ⅲ级围岩		双线隧道断面面积为 120 m^2 ，单线隧道断面面积为 55 m^2	双线隧道采用 CD 法，单线隧道采用台阶法	系统注浆锚杆 (5 m，纵 1 m \times 环 1 m)		最小岩柱厚度 3.8 m

备注：围岩分级分类中，公路规范和铁路规范定义有区别：公路定义分类，类别越低，围岩越差；铁路定义分类，级别越低，围岩越好。

第 2 章 小净距隧道开挖理论解析解

在隧道开挖过程中，围岩的承载条件是不断变化的。开挖前，围岩处于天然平衡状态。岩土开挖使围岩失去原有的平衡状态，其内部原有应力场发生改变，引起应力重分布，发生变形、松弛，黏结力和内摩擦角变化，强度和承载力降低。如果围岩新应力场中的应力没有超过围岩自身的承载能力，围岩本身就会自行平衡；否则，围岩将产生破坏，出现破裂、掉块甚至坍塌等。在此情况下，需要构筑支护承载结构进行人工稳定。

从初始应力场变化到新的平衡应力场的过程，即为应力重分布。经应力重分布形成的新的平衡应力，即次生应力。隧洞开挖后周围经应力重分布后的应力状态称为二次应力场；衬砌修筑后，围岩的变形受到衬砌结构的约束，会影响应力重分布过程的进行，衬砌修筑后隧道周围地层的应力状态称为三次应力场。

实现隧道工程稳定的条件是：

$$\sigma_{\max} < S \quad (2.1)$$

$$u_{\max} < U \quad (2.2)$$

式中： σ_{\max} ——围岩最大应力（MPa）；
 S ——围岩允许最大应力（MPa）；
 u_{\max} ——围岩最大位移（mm）；
 U ——围岩允许最大位移（mm）。

在充分调查影响工程稳定性的各种因素基础上，正确了解和掌握隧道工程力学，定量分析、计算隧道结构应力及位移，才能做出科学合理且具备可实施性的隧道工程设计，确保隧道工程稳定、安全。

采用经典的数学力学方法解隧道结构力学问题时，解析方法是主要手段之一。解析方法是指采用数学力学的计算取得闭合解的方法。在使用解析方法时，会用到反映岩土力学基本性质的关系式，即本构方程，要特别注意这些物理关系式和围岩所处的物理状态相匹配，反映其真实的力学行为。解析方法可以解决的实际工程问题较为有限，但是，通过对解析方法及其结果的分析，往往可以获得一些规律性的认识，这是非常重要和有益的。

为了获得在初始地应力场条件下隧道开挖的应力解和位移解，过去很长一段时间主要采用弹性力学中经典的逆解法、半逆解法来求解具体问题，但在边界形状稍复杂的情形下，采用这些方法几乎无法求解。

自从 Euler 建立了复变函数理论后，复变函数已形成了非常系统的理论，被广泛应用于弹性力学领域。在隧道工程中遇到的平面弹性力学问题大多数都可以归类为孔口问题，而孔口断面的形状多为不规则的图形。复变函数法有保角变换功能，可以把复杂形状的边界变换

为简单形状的边界，把在简单边界下求得的解再变换回去，从而求得原问题的解。虽然变换使原问题的应力（位移）边界条件的形式变得复杂，但会在变换后得到更简单的几何边界形状而得以求解。

2.1 单洞圆形断面隧道开挖经典解析解

在诸多影响隧道工程开挖稳定性的因素中，地应力状态是最重要最根本的因素之一，它对隧道开挖后围岩应力分布、变形和破坏影响极大。

围岩的初始应力状态主要受两类因素的影响：一类是重力、地质构造、围岩的物理力学性质等常态性的因素；另一类是地壳运动、地下水运动等暂时性的或局部性的因素。

因此，初始应力场基本由两种力系构成，即：

$$\sigma = \sigma_y + \sigma_T \quad (2.3)$$

式中： σ_y ——自重应力分量；

σ_T ——构造应力分量。

构造应力场是指形成构造体系和构造型式的地应力场，包括构造体系和构造型式所展布的地区，连同它内部在形成这些构造体系和构造型式时的应力分布状态。由于构造应力场的不确定性，很难用函数形式表达，只能通过某些量测数据加以分析。目前，主要研究的是由围岩自重应力形成的应力场，重力应力场的估算可以采用连续介质力学的方法。

2.1.1 应力场的理论解析

因初始地应力场的存在，在力学原理上，隧道开挖就成为在已有初始应力场的地层中开孔。单洞隧道结构中圆形断面的受力在弹性力学中有完整的解析解，图 2.1 所示为一单洞圆形隧道计算力学模型。对于双洞结构的受力情况，在弹性条件下可以利用两个单洞应力场进行叠加。

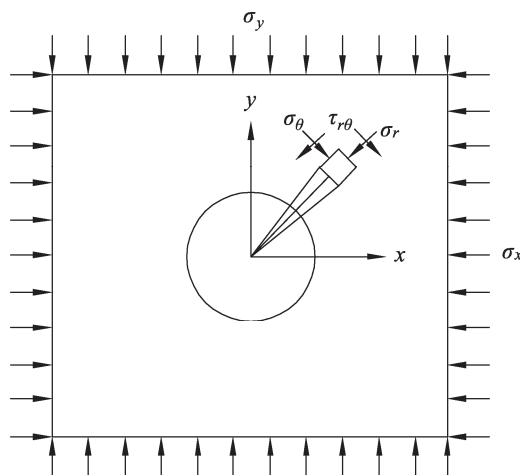


图 2.1 单洞圆形断面隧道计算力学模型