

小净距隧道围岩 稳定性解析与模拟研究

◎ 杨建辉 祝江鸿 著

地质出版社

小净距隧道围岩稳定性解析 与模拟研究

杨建辉 祝江鸿 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书首先对单洞隧道问题的解析解进行了研究。从三角插值理论出发,研究了以洛朗级数表示的单位圆外——单洞外无限域的映射函数求解问题,并利用柯西积分法推导了复杂断面单洞隧道围岩应力和位移的解析解。然后利用交替法原理、映射函数和单洞隧道解析解,推导了小净距隧道围岩应力和位移平面弹性解析解。并利用该解析解,研究了洞形、埋深和围岩性质等因素对小净距隧道围岩应力和位移分布的影响规律,研究了净距对围岩应力和位移的影响规律,获得了应力和位移发生突变的净距值。

采用 ANSYS 有限元分析软件,开展了毛洞条件下小净距隧道围岩稳定性分析,通过常用开挖方案的数值模拟,研究了隧道施工过程力学行为;开展了不同支护强度组合下小净距隧道围岩的应力、位移特点;最后结合模型试验,研究了不同净距下围岩稳定性与破坏特征,提出了合理净距建议值。

本书可供隧道、矿山、水利、交通等系统的广大科技工作者及相关专业的院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

小净距隧道围岩稳定性解析与模拟研究 / 杨建辉等
著. —北京:地质出版社, 2015. 7
ISBN 978 - 7 - 116 - 09166 - 5

I. ①小… II. ①杨… III. ①隧道工程—围岩稳定性
—研究 IV. ①U452. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 038546 号

责任编辑:白 铁 杨 艳 罗军燕
责任校对:关风云
出版发行:地质出版社
社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083
咨询电话:(010) 66554528 (邮购部); (010) 66554625 (编辑室)
网 址: <http://www.gph.com.cn>
传 真:(010) 66554686
印 刷:北京地大天成印务有限公司
开 本:787 mm × 1092 mm ¹/₁₆
印 张:7.75
字 数:200 千字
版 次:2015 年 7 月北京第 1 版
印 次:2015 年 7 月北京第 1 次印刷
定 价:30.00 元
书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 09166 - 5

(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)

作者简介

杨建辉, 1965 年 4 月出生, 河北人。博士、教授, 浙江科技学院教师。中国岩石力学与工程理事, 浙江省岩土力学与工程学会常务理事、副理事长。主要从事岩石力学、隧道工程等教学科研等工作。主要研究方向是隧道等地下岩体工程灾害发生机理和控制技术研究。主持完成多项纵向科研项目, 其中基金类项目 2 项, 研究成果达到国际先进水平。在专业重要刊物上发表论文 40 余篇, 出版专著《基于岩体结构分析的煤巷锚杆支护技术》, 参编 4 部。参与的项目成果获得河北省、浙江省科技进步三等奖各一次。应用岩体结构力学理论, 在大量工程实地考察的基础上, 研究了深埋矿山巷道围岩块裂结构、层状结构、碎裂结构、散体结构岩体的工程地质特征、灾害类型与机制, 提出了相应锚固支护措施与参数选择方法。应用物理模拟实验方法, 研究了单层岩石和多层岩石锚固体全应力学性质、结构演化过程和失稳机理, 提出层状结构岩体的锚固机理为组合拱梁理论, 建立了拱梁应力的计算公式, 该公式可全面地反映岩体层厚、锚杆长度、巷道跨度等参数对岩体稳定性的影响。

祝江鸿, 1974 年 5 月出生, 浙江人, 博士、高级工程师, 浙江科技学院教师。主要研究方向为地下岩体工程力学分析中的数值法和解析法。主持和参与多项省部级科研项目, 在专业重要刊物上发表论文 10 余篇, 参编专著 1 部。在应用复变函数理论开展地下洞室的力学解析分析方面有一定的突破, 提出的单位圆外域到任意开挖断面隧洞外域共形映射的计算方法, 具有操作简单、精度高和收敛快等特点, 可较方便地求解任意断面洞室的共形映射函数; 利用任意开挖断面洞室的共形映射函数, 从洞室围岩应力边界条件出发, 借助复变函数理论获得了用来求解围岩应力和位移的应力函数通式; 运用上述两个研究成果可方便地开展地下任意开挖断面洞室的力学解析分析。目前主持的浙江省自然科学基金在研项目“任意开挖断面隧洞围岩力学复变函数分析法中的共形映射方法”(LY14E080012), 将对单位圆内(外)域-任意开挖断面隧洞内(外)域的共形映射函数模型构建和求解展开系统研究, 研究成果可促进共形映射方法在地下隧洞围岩力学复变函数分析法中发挥桥梁作用。

前言

近年来,随着我国高等级公路建设迅速发展,小净距隧道获得越来越多地应用。由于对小净距隧道结构稳定性机理和施工过程力学规律认识还不成熟、设计施工规范中存在缺陷,从现有的工程实践中发现,部分小净距隧道工程存在着施工过程中的围岩稳定性、运营过程中的隧道结构耐久性和有效性得不到保证及工程造价居高不下等现象,这与现阶段对小净距隧道研究所依托的理论基础和采用的研究方法是密不可分的。

连续介质理论、地质力学理论及“人-地”系统论是目前小净距隧道工程研究所依托的理论基础。在这些理论基础上发展起来的理论解析、数值模拟(有限元、边界元及离散元等)、试验模拟(模型试验和原位试验)和监控量测等是小净距隧道工程的主要研究方法。以具体工程作为研究对象的数值模拟、试验模拟和监控量测等手段,其获取的位移和应力信息就工程本身意义是重大的,但对同类问题做规律性研究还需要积累更多的工程案例。建立在一定假定和简化基础上的解析解研究,对工程问题往往可以进行规律性研究,其研究方法和结论在理论价值上是不容忽视的。然而,受制于数学计算方法研究的缺失,单洞隧道围岩应力场和位移场解析解的研究成果更多地集中在圆形隧道方面。对于小净距隧道,由于洞形的一般性及其平面问题在力学上属于双连通域,给解析解的求解带来了巨大困难,应用解析解研究小净距隧道围岩稳定性和合理净距问题尚属空白。

复变函数法是求解地下洞口平面力学问题的强大工具。利用复变函数法获取小净距隧道围岩应力场和位移场解析解,需解决三大问题:一是将单位圆映射成符合精度要求的普通隧道断面的映射函数求解;二是单洞隧道平面力学问题的解析函数解析显式的获得;三是将双连通域问题转化成一系列单连通域问题求解的具体方法。作者以上述三大问题为重点,给出了利用复变函数法求解小净距隧道围岩应力场和位移场解析解的最新研究成果;以某小净距隧道作为依托工程,运用解析解成果、数值方法和监控量测等手段,开展小净距隧道围岩稳定性与合理净距研究,把握小净距隧道结构稳定的力学机理和施工过程的力学行为,在围岩稳定与净距设定、断面选择、开挖方案、支护参数设计等关系方面给出了结论性成果。

本书将小净距隧道平面力学复变函数法的最新研究成果应用到具体工程中,并结合其他研究手段开展了小净距隧道相关问题的研究,一方面实现基于各种研究方法下的部分结果相互验证,为复变函数理论应用于小净距隧道提供了有益的探索,为隧道工程的设计理论丰富和完善起到积极作用;另一方面,借助于多手段获得的小净距隧道围岩稳定性与合理净距的研究成果,将为工程的设计施工提供有益参考。当然,由于作者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

二〇一四年六月一日

目 录

作者简介

前 言

1 绪论	(1)
1.1 研究背景和意义	(1)
1.2 小净距隧道有关问题的研究现状	(3)
1.2.1 小净距隧道围岩稳定性影响因素研究	(3)
1.2.2 小净距隧道围岩稳定性评价方法和指标研究	(8)
1.2.3 小净距隧道围岩稳定性研究方法	(11)
1.3 存在的问题	(14)
1.4 研究内容	(14)
2 分离式隧道平面力学问题的复变函数解法	(16)
2.1 弹性平面力学问题的复变函数表示	(16)
2.1.1 双调和函数的复变函数表示	(17)
2.1.2 应力分量和位移分量的复变函数表示	(17)
2.1.3 边界条件的复变函数表示	(17)
2.1.4 $\varphi(z)$ 和 $\psi(z)$ 的讨论	(18)
2.2 圆形隧道围岩应力场的柯西积分解法	(19)
2.2.1 圆形隧道条件描述及映射函数	(19)
2.2.2 圆形隧道平面力学问题的复变函数表示	(19)
2.2.3 解析函数 $\varphi_1(\zeta)$ 和 $\psi_1(\zeta)$ 的求解	(20)
2.2.4 解析函数 $\varphi(z)$ 和 $\psi(z)$ 的求解	(21)
2.2.5 算例	(22)
2.3 近似映射函数求解研究	(24)
2.3.1 映射函数的建立	(25)
2.3.2 映射函数的求解	(26)
2.3.3 算例	(27)
2.4 任意断面隧道平面力学问题中的两个解析函数求解	(30)
2.4.1 两待求解解析函数及边界条件在 ζ 平面上的表示	(31)
2.4.2 $\varphi(\zeta)$ 、 $\psi(\zeta)$ 的求解	(31)
2.4.3 $\varphi(\zeta)$ 、 $\psi(\zeta)$ 的验证	(36)
2.5 复杂隧道断面围岩应力场和位移场求解	(36)
2.5.1 标准隧道断面围岩应力和位移计算条件	(36)
2.5.2 标准隧道断面映射函数	(37)

2.5.3	以 ξ 表示的应力和位移计算公式	(38)
2.5.4	应力场求解结果分析	(38)
2.5.5	围岩位移分析	(40)
2.6	小结	(42)
3	基于复变函数法的小净距隧道围岩稳定性与合理净距研究	(44)
3.1	Schwarz 交替法原理	(44)
3.1.1	Schwarz 交替法原理	(44)
3.1.2	双连通域中的弹性力学边值问题的 Schwarz 交替法实现	(46)
3.2	圆形小净距隧道解析函数研究	(47)
3.2.1	不同坐标系下解析函数的变换	(48)
3.2.2	两圆孔洞下 $\varphi(z)$ 和 $\psi(z)$ 的求解	(49)
3.3	复杂断面小净距隧道围岩应力场和位移场解析解研究	(54)
3.3.1	三个问题	(54)
3.3.2	$\varphi_*(\xi)$ 和 $\psi_*(\xi)$ 的交替迭代求解	(55)
3.3.3	迭代次数讨论	(57)
3.4	洞形条件分析	(58)
3.4.1	依托工程概况	(58)
3.4.2	计算条件	(58)
3.4.3	不同洞形的映射函数	(59)
3.4.4	计算结果分析	(60)
3.5	埋深和围岩条件分析	(64)
3.5.1	埋深条件分析	(64)
3.5.2	围岩条件分析	(68)
3.6	净距对围岩稳定性的影响分析	(71)
3.6.1	计算参数	(71)
3.6.2	围岩应力	(71)
3.6.3	围岩位移分析	(72)
3.7	小结	(76)
4	小净距隧道围岩稳定性与合理净距模拟研究	(77)
4.1	小净距隧道毛洞围岩稳定性分析	(77)
4.1.1	数值计算模型	(78)
4.1.2	开挖洞形分析	(79)
4.1.3	围岩条件分析	(81)
4.1.4	埋深条件分析	(84)
4.2	小净距隧道开挖力学分析	(86)
4.2.1	计算模型和参数	(87)
4.2.2	开挖方案设计	(90)
4.2.3	模拟结果分析	(91)
4.3	小净距隧道支护强度分析	(96)

4.3.1	支护强度设计	(96)
4.3.2	支护方案设计	(97)
4.3.3	支护效果分析	(97)
4.4	小净距隧道合理净距研究	(101)
4.4.1	合理净距确定准则	(101)
4.4.2	数值模拟条件	(101)
4.4.3	洞周位移分析	(102)
4.4.4	洞周应力分析	(104)
4.4.5	围岩塑性区分析	(105)
4.5	小净距隧道合理净距模型试验研究	(105)
4.5.1	试验装置	(105)
4.5.2	模型试验方案	(107)
4.5.3	试验结果与分析	(108)
4.6	小结	(111)
参考文献		(113)

1 绪 论

1.1 研究背景和意义

我国地域辽阔,山地和丘陵占国土面积的 $2/3$,因而在公路修建过程中隧道工程众多。截至 2010 年底,我国隧道总数已达 1.1 万座左右,总长度 11000 km 左右,其中公路隧道 5673 座,总长度 3555.5 km,是世界上公路隧道最多的国家。我国公路隧道的数量、规模和建设速度,堪称世界之最。

根据交通运输部有关部门的规划,到 2020 年我国将形成 8.5×10^4 km 国家高速公路网,当前已建和在建高速公路约 4.5×10^4 km,而待建达 4×10^4 km,约占总里程的 47%。在待建工程中,中西部地区约为 3.2×10^4 km。可见,今后建设任务的重点主要集中在中西部地区。在以山岭和丘陵为主要地质特征的中西部地区的公路建设中,隧道方案因具有缩短行车里程、提高线型标准、保障运营安全及保护生态环境等优点,而得到普遍应用。

在山岭重丘区,隧道形式的选择不仅受地形、地质条件的约束,同时受路线平、纵、横指标等因素的制约。在地形、地质条件允许的情况下,通常按照《公路隧道设计规范》(JTG D70-2004)对隧道净距的要求,设计为上下行分离的两座独立隧道。而在地形陡峻、脊谷相间的“鸡爪”地带,为了满足规范对双洞净距的要求,往往强行拉开隧道间距,导致与隧道相邻路段平面线形不顺畅、桥隧相连地段不能有效兼顾桥梁布置的要求、工程占地较宽、洞口挖方量大等突出问题,目前山区高速公路造价居高不下也与此有关。为了解决这些问题,隧道工程师提出了一种新型的隧道结构型式,即小净距隧道。所谓小净距隧道,是指隧道间的中岩柱厚度小于规范建议值,双洞净距一般小于 1.5 倍洞径的隧道。小净距隧道作为一种新型结构型式,能很好地满足特定地质和地形条件、线桥隧衔接方式,有利于公路整体线型规划和线型优化,具有独特的适应性和优越性。正因如此,近年来在高等级公路建设中得到了越来越广泛的应用,如招宝山隧道(隧道净距 3.50 m)、董家山隧道(隧道净距 3.75 m)、金期山隧道(隧道净距 5.08 m)、里洋隧道(隧道净距 5.86 m)和丰泽街隧道(隧道净距 6.4 m)等。上述隧道的建成不仅产生了巨大的社会效益和经济效益,而且为我国小净距公路隧道的设计和施工积累了初步的经验。

隧道工程是一个经验性极强的学科,长期以来都是凭经验设计施工,带有一定的盲目性。从以往的工程实践和已有的研究成果中发现,小净距隧道存在下述问题:一是部分工程在施工过程中围岩稳定性得不到保证,存在地表下陷、洞口和掌子面塌方、拱顶悬垂与塌落、中岩柱及拱腰突出与滑移,以及底拱鼓胀与隆起等失稳现象;二是在运营过程中隧道结构的耐久性和有效性得不到保证,不同程度地存在隧道渗漏、衬砌开裂、界限受侵以及衬砌结构和围岩结合不密实等病害或质量问题;三是更多的小净距隧道从工程技术角度看是成功的,但工程造价居高不下;四是相同和相似工程的研究结论差异较大。这些问题

产生的原因，一是归因于小净距隧道结构的特殊性。小净距隧道两洞体围岩相互重叠，在隧道开挖过程及成型之后存在围岩应力调整和位移相互干扰，尤其中岩柱是薄弱部位，其稳定性特征与一般的分离式隧道（独立隧道）差异较大，给设计和施工带来困难。二是小净距隧道工程的复杂性。小净距隧道的结构安全性既受到地形、地质和地貌等环境因素的制约，又受到隧道断面形状、跨度、净距、支护方案及参数等设计因素的制约，还受开挖方法、顺序和方案等施工因素的制约，很难有统一的设计施工标准。运用统一的标准指导设计和施工过程，结果很可能导致小净距隧道工程方案偏保守，造成工程造价居高不下；也可能存在设计和施工不合理或者是安全系数偏小，造成工程失败或存在质量问题。

由于小净距隧道在我国尚属新型隧道结构型式，出现和应用的历史不长，现行的隧道设计施工规范对小净距隧道的净距选择、围岩压力计算、隧道断面形状确定、监控量测项目和基准、支护参数设计、开挖方案比选及围岩稳定性评价指标等方面都没有明确规定，实际工程中经常是在独立隧道的基础上稍作调整和加强。对小净距隧道问题的研究手段主要是数值模拟、模型试验和监控量测等，研究内容集中在设计理论、施工过程模拟、爆破震动控制和支护技术等方面的研究。在这些研究手段中，比较典型的有散体理论分析、极限平衡分析、应力应变分析（有限元、离散元及边界元等）、地质力学模型试验、工程类比分析以及块体理论分析等。在利用解析解方法对小净距隧道围岩稳定性及合理净距方面作规律性研究和探讨尚属空白。

建立在一定假定和简化基础上的解析方法，在力学数学处理上较繁琐且可以解决的实际工程问题十分有限，但通过对解析方法及其结果的分析，可对岩石地下工程力学问题做规律性研究，对小净距隧道问题亦然。然而，目前对地下洞口平面力学问题的解析解，只能解决简单洞形的单连通域问题，对于复杂洞形的单连通域问题，其解析解只能采用复变函数法且求解过程也要复杂得多。由于获得合理的（能将单位圆映射成实际断面形状且符合精度要求）映射函数的难度较大，以及运用该映射函数推导出应力和位移解析解的过程相对复杂，目前地下单个洞口平面力学问题的解析解成果更多的是在圆形隧道方面，其他洞形的研究成果不多，更没有找到其通解形式。利用复变函数寻找小净距隧道平面力学问题解析解不仅存在上述难点，而且小净距隧道在力学上属于双连通问题，如何将双连通域问题归化为单连通域问题也是求解的难点之一。因此，地下洞室双连通域和多连通域平面力学问题的解析解研究成果是很少的，且解的通用性不强，将解析解成果用于小净距隧道围岩稳定性分析与合理净距确定更属于空白。

对小净距隧道问题进行研究的一条重要原则，就是要根据具体问题采用基于相同假设基础上的多手段分析。任何一种围岩力学分析手段都有其适用性和局限性，采用基于相同假设基础上的多手段分析可以让研究结果更具有可比性和可信度。建立在连续介质理论基础上的小净距隧道解析解，在其应力场和位移场的获取上比较方便，对围岩应力、位移和稳定性的影响因素分析快捷有效，易于获得规律性的认识，但其能解决的问题只局限于围岩受力分析的弹性阶段，且无法对小净距隧道施工过程和支护效果进行模拟。同样建立于连续介质理论基础上的有限元分析手段，不仅能模拟岩体的复杂力学与结构特性，也可很方便地分析各种边值问题和施工过程，并对工程进行预测和预报，因此成为小净距隧道工程设计施工和研究采用的最常用工具之一。然而，有限元是把一个实际的结构物或者连续体用一种由多个彼此相联系的单元体所组成的近似等价物理模型来代替，相邻界面只能存

在位移协调,对于奇异性问题(应力出现间断)的处理比较麻烦;而且当影响小净距隧道围岩稳定性因素以较小值变化时,由于应力场和位移场解是近似解,对小净距隧道围岩稳定性影响因素的敏感程度分析的效果并不理想。另外,监控量测方法能够获得小净距隧道施工过程中的围岩实时信息,但对这些信息进行分析以及选择工程措施时,依然要依靠具体的围岩力学分析。因此,对小净距隧道围岩稳定性与合理净距做具体研究时,一定要采用多种分析手段,做到取长补短,使研究结果更有说服力和工程指导意义。

针对上述问题,作者以某小净距隧道作为依托工程,运用解析方法、数值方法和监控量测等多种手段,开展小净距隧道围岩稳定性与合理净距研究,研究成果不仅直接服务于所依托的工程,为该小净距隧道建设提供技术支撑;而且通过多种研究手段所获得的成果可为小净距隧道相关设计规范、施工技术规范等的编制提供建议和参考;尤其将复变函数理论应用到小净距隧道平面力学问题的研究,将为工程设计理论的丰富和完善起到积极作用。

1.2 小净距隧道有关问题的研究现状

小净距隧道指上下行双洞洞壁净距较小,不能按独立单洞考虑的隧道结构。根据两隧道相对位置的不同,小净距隧道可分为三种布置形式:并排布置(无竖向间距)、斜交布置(既有水平间距也有竖向间距)、上下布置(无水平间距,又称背驮式)。小净距隧道最早出现在城市地铁建设项目中,是大多数城市地铁隧道中的一种常见结构形式,其中的并行小净距隧道应用最为广泛,一直是研究的重点和热点。早在1942年,国外就有文章报道了双洞净间距为 $0.425B$ (B 为隧道跨度)的并行隧道建设;随着铁路复线的大量建设,促使大量小于分离式隧道间距规定的并行小净距隧道出现。20世纪80年代我国开始小净距隧道的研究,招宝山隧道是我国早期最为著名的小净距公路隧道。时至今日,随着隧道建设的大力发展,受地形、地物、水文地质条件以及规划要求等因素的影响,国内外高速公路、双线铁路、城市地铁等工程项目越来越多地采用小净距隧道方案。国内外关于小净距隧道问题的研究,主要采用数值计算、模型试验和监控量测等手段,对洞室之间的相互影响、中岩柱的稳定性及加固措施、开挖方法和顺序、围岩压力计算及围岩稳定性评价方法等方面作了一定研究,并取得了一定的成果。

1.2.1 小净距隧道围岩稳定性影响因素研究

长期以来,国内外学者一直非常重视隧道围岩稳定性问题的研究。由于小净距隧道两洞体围岩相互重叠,隧道开挖后围岩应力和位移调整存在相互干扰,尤其是岩柱是围岩稳定性的最薄弱部位,其稳定性问题比单线隧道要复杂得多,各因素对围岩稳定性的影响规律也较复杂。影响小净距隧道围岩稳定性因素概括起来有:隧道埋深、断面形状及隧道净距等横向因素;围岩级别、地质条件及水文条件等介质因素;开挖方案、开挖顺序及支护方案等纵向因素,现分述如下。

(1) 净距问题

上下行分离式隧道(独立隧道)施工时,由于两隧道之间的净距较大,可忽略施工对彼此的影响。小净距隧道施工时,净距大小直接决定了洞室相互之间的影响程度,双洞

之间的相互影响不能忽略。净距问题是小净距隧道结构的核心问题,合理净距研究一直是小净距隧道问题的研究热点和难点。20 世纪 70 年代初,日本铁道技术学会发表了“关于平行隧道研究的报告”,指出当把地层当作完全弹性体时,平行隧道的中心距约为开挖宽度的两倍;而在黏土等软土层中,则为开挖宽度的五倍;并且规定平行公路隧道的标准中心距为 30 m,国铁单线隧道的标准净距是 20 m^[1]。这些规定是在毛洞条件下,通过推导两洞之间不产生相互影响而得到的,并被许多国家所借鉴,我国的铁路和公路隧道设计规范亦借鉴了这一规定。然而,大量工程实践表明,只要两相邻隧道间的岩柱具有足够的强度和稳定性,不致危及两相邻隧道的施工和结构安全,则可认为隧道间的净距是合理的。关于小净距隧道的合理净距问题,挪威的经验是隧道净距与隧道高度相近,对高洞可取隧道高度的 0.6~0.8 倍,但最小净距不宜小于 5 m,对扁平隧道其净距则要稍大些;美国经验认为,围岩质量较好时,浅埋隧道净距可取与隧道上覆最小岩石厚度或隧道跨度相等^[2];Ghaboussi 等通过研究指出,当隧道净距超过 2 倍洞径,相邻隧道施工引起的位移和单洞隧道施工状况基本相同^[3];Fujita 和 Fang 等认为,隧道净距超过 1.7 倍洞径时,双洞施工将不产生显著影响^[4,5];日本在近接隧道施工影响范围划分基础上,针对两隧道不同位置关系,将隧道净距与影响范围联系起来,提出平行双洞隧道影响限制范围为 1 倍洞径^[6]。

20 世纪 80 年代,我国开始了双洞隧道净距问题的研究。朱敬民等^[7]通过研究提出,当两洞中间岩柱的厚度大于 23 m 时,在开挖时将不会产生相互影响;王景春等^[1]认为,合理的相邻隧道中心距必须经过综合分析确定,应综合考虑隧道所处的地质条件、断面形状、现有隧道的衬砌情况、施工方法等因素,通过类比初步确定间跨比,再进行分析验证确定最佳相邻隧道中心距。厦门市政建设指挥部等进行了“现代城市双洞、双线隧道修建技术的研究”^[8],提出了城市双线隧道最小净距的参考值,在净距优化上有了较大突破;张玉军等^[9]结合京珠国道沿线近距离双隧道开挖与支护过程,对比分析了围岩与支护结构的受力、变形及塑性、受拉区的演化状况,提出了双洞净距压缩的可能性。刘伟^[10]依托京福高速公路小净距隧道群的工程实践,对两车道小净距隧道净距优化进行了较系统的研究,分析总结了小净距隧道合理净距取值的准则,同时得出了不同围岩级别下隧道最小净距的取值;鲁彪^[11]和田志宇^[12]也分别对两车道小净距隧道围岩稳定性进行了分析研究,提出了不同围岩级别下隧道最小合理净距取值。刘艳青等^[13]研究表明,当两隧道中岩柱厚度为 2~3 m 时,塑性区连通,当岩柱厚度扩大到 4 m 时,塑性区范围显著减小。黄拔洲等^[14]比较了净距分别为 3 m 和 4 m 时的隧道力学状态,分析表明当隧道净距在 3 m 时,中岩柱的受力状态要远比 4 m 净距时严峻得多,相应的围岩加固也会增加难度;秦峰等^[15]对 5 m 左右的小净距隧道施工特点进行分析并指出了其具体特征;冯升等^[16]通过数值分析指出了 5 m 左右的小净距隧道相对连拱隧道的优越性;姚勇等^[17]分析不同净距对中间岩柱塑性区的影响,得出当隧道净距 2 m、3 m 时中岩柱塑性区完全贯通,当净距为 6 m 时岩柱塑性区显著减小,且不贯通。

从上述研究可以看出,国内外关于小净距隧道划分原则及标准较一致,以上下行并设隧道施工时是否存在相互影响作为区别独立隧道与小净距隧道的原则,并且根据围岩等级不同,净距标准一般在 1~5 倍洞径之间。净距大于这个范围,则认为双洞之间的相互影响可以忽略,净距小于这个范围则作为小净距隧道问题研究。我国现行《公路隧道设计

规范》中,根据两相邻隧道应分别置于围岩压力相互影响及施工影响范围之外的原则,区分上下行独立隧道和小净距隧道的净距标准与上述范围一致。然而,这仅仅是小净距隧道净距问题中的上限问题,对净距下限问题的研究结论则存在较大差异,即在确保小净距隧道围岩稳定的前提下,净距最小可以优化到何种程度。从目前已建和在建的小净距隧道工程来看,绝大部分隧道净距远小于规范中的上限值,但净距取值差异较大。因此,对小净距隧道工程的合理净距研究,目前还没有形成系统的统一认识和结论。产生上述问题的原因,与研究所依托的工程、所采取的研究方法以及所选用的评价准则等方面的差别是有关系的。实际上,在影响小净距隧道围岩稳定性主要因素中,除净距问题外,还有围岩级别、开挖方案和支护加固方案等。理论上讲,合理净距是相对的,只要采取合理的设计和施工措施,较小净距的上下行并设隧道工程均可取得成功。因此,对净距问题的研究应集中在两个方面:一是在路线型允许的范围内,研究净距调整对围岩应力和位移分布的影响规律,掌握围岩应力和位移发生突变的临界点净距;二是研究一定净距条件下,应采取何种设计和施工措施才能确保小净距隧道围岩的稳定性,并对各种方案做技术经济性比较,保证工程顺利实施。从已有的文献看,对上述两个问题的研究是缺乏系统性的,研究结论也是不成熟的。

(2) 开挖顺序与爆破震动研究

隧道的施工从开始到结束必然有一个较长的时间过程,由于隧道的开挖,围岩的物理学性质和力学平衡状态将发生变化,施工过程中各种合理施工措施的选用则保证了围岩应力和位移状态的平稳调整,达到施工完毕后新的平衡和稳定状态。因此隧道开挖后,围岩稳定性是随时间和空间不断变化的三维问题。从力学角度来讲,开挖和支护都是对围岩施加荷载,由于地层的复杂性,隧道围岩往往是非弹性介质,围岩的最终力学状态必然与应力路径相关,即隧道开挖方法与顺序对围岩稳定性影响显著^[18]。其影响主要体现在以下三个方面:①隧道开挖引起了地层应力变化,其应力变化空间路径随不同的开挖加载步距和顺序而不同;②初次支护的本质是改善和提高围岩的各项力学性能指标,开挖过程直接决定了初次支护在空间上的展开顺序;③开挖(爆破)作用引起的震动效应。

小净距隧道结构的特殊性决定了施工过程中双洞相互影响显著,开挖引起的围岩应力和变形特点及对围岩稳定性的影响要比普通隧道复杂。在进行小净距隧道施工方案设计时,应考虑加载方式在时间和空间上的展开顺序对围岩最终力学状态的影响。因此,国内外针对开挖方案及开挖力学行为对小净距隧道围岩稳定性的影响展开了大量研究。川田等依托田真新镇干线公路上的尾山大理隧道对小净距隧道设计、开挖方式进行了系统研究^[19]。日本在小净距隧道近接施工问题上,于1987年编制了《近接施工的设计与指南》,初步给出了隧道结构相互影响的基本条件、影响范围的分类与划分、影响预测和施工对策^[20]。虽然针对小净距隧道日本制定了相关规定,但由于小净距隧道工程的复杂性,日本在进行小净距隧道施工时,结合特殊地质及地形条件,还在进一步采用新的研究手段,对施工期间的开挖支护方法、监控量测基准、支护参数、衬砌结构的安全性等多项内容进行大规模技术研究^[21,22]。其他国家对小净距隧道施工的研究则不太系统,仅针对工程事例进行模拟计算方面的探讨。我国在该问题的研究上主要集中在不同围岩级别下合理的开挖方法和开挖顺序选择方面,并取得了较好的施工效果:Ⅰ与Ⅱ级围岩采用超前导坑预留光爆层——台阶法或双洞台阶法、Ⅲ与Ⅳ级围岩采用上下台阶——侧壁导坑组合法、Ⅴ

与Ⅵ级围岩采用双洞侧壁导坑法^[23,24]；靳晓光等应用有限元法对施工方案进行了对比，提出同一围岩条件下优先顺序为双洞侧壁导坑法、上下台阶——侧壁导坑组合法、双洞台阶法^[25]；晏启祥等用有限元模拟表明要慎重选择后开洞的施工方案，应尽量延迟形成中岩柱的时间^[26]；刘生秀认为在浅埋软弱围岩段施工时，对后开洞应先开挖中岩柱侧的导洞，超前加固中岩柱^[27]；龚建伍^[28]结合福州国际机场高速公路鹤上大断面小净距隧道工程实际，对双侧壁导坑法、中隔壁法和上下台阶法3种开挖方案进行研究比较，认为上下台阶法相对较为不利，实际施工时在确保安全施工的前提下应根据围岩实际情况，选择施工成本低、施工进度快的开挖方案。

另外，小净距隧道施工特别强调中岩柱的稳定和爆破振动对相邻隧道的影响，这也是小净距隧道与分离式独立双洞隧道的不同之处。小净距隧道施工爆破产生的振动对相邻隧道结构安全的影响一般都比较严重，有可能会对相邻隧道造成损伤，如日本的获津公路初狩隧道、意大利的LocooColin公路隧道，国内的西康线响水沟隧道、湘黔铁路增建11线坪口隧道、流潭隧道等，均发生了爆破振动引起隧道衬砌开裂、剥落等现象^[29,30]。因此，在小净距隧道施工过程中，有必要对中岩柱受爆破振动的影响进行相关监测，以减少或避免爆破施工对相邻隧道的损伤。史雅语^[31]、刘慧等^[32,33]对招宝山小净距隧道施工爆破进行了监测分析，研究了不同爆破方式对隧道的影响，结果表明在中槽爆破中布置预裂孔或防震带，可取得显著的减震效果。阳生权^[34,35]对梧桐山小净距隧道开挖爆破振动速度和加速度进行了测试分析，结果指出相同断面加速度峰值拱顶高于边墙；先行洞近中岩柱侧振动加速度峰值显著大于远离岩柱侧，数量上二者相差2~8倍；水平方向加速度峰值基本大于垂直方向；如以加速度峰值作为安全判据，则上下台阶法爆破施工为最优爆破施工法。卓效明^[36]结合厦门仙岳山公路隧道分析了小线间距城市公路隧道纵向振速衰减规律、隧道横断面振速分布规律，提出了隧道各类围岩爆破振动振速允许值和隧道振动安全判据。

综上所述，由于小净距隧道结构的复杂性和新颖性，在设计和施工之前必须对隧道施工力学行为进行分析研究，掌握围岩稳定性处于最不利状态的具体部位。通过对施工方案的比选，分析各种施工方案对围岩稳定性的影响程度，据此选用合理的施工方法以减小对围岩的扰动。研究人员针对这些问题进行了大量有意义的实践和探讨，并基本形成了一些共识和结论：依据围岩级别采用不同的开挖方法和开挖顺序；开挖方法和开挖顺序的选择应尽可能减少中岩柱的塑性区面积或减少洞周特征点位移量；考虑到相邻隧道的相互影响，应将双洞开挖掌子面保持一定距离。

(3) 支护结构

隧道作为一种特殊的工程结构体系，在整个施工过程及运营期间，其力学特性和稳定性不仅受到围岩地质环境、隧道形状和开挖方法等因素的影响，还受到作为隧道结构组成部分的支护结构的影响，支护方案的合理与否在一定程度上决定了隧道建设的成败。合理支护结构的设计依托于围岩与支护的相互作用理论的发展及支护技术的进步。20世纪早期，以普氏为代表的古典地压理论，认为巷道支护的压力就是拱内岩石重量，坍塌拱的高度与地下工程跨度和围岩性质有关，而与隧道埋深无关；20世纪50年代，人们开始用弹塑性力学来解决隧道支护问题，逐渐意识到埋深对地压的影响以及围岩具有自承能力，20世纪60年代提出了新奥法设计施工理念，即“利用隧道围岩的自承能力来支撑隧道，促

使围岩本身变为支护结构的重要组成部分,使围岩与构筑的支护结构共同形成坚固的“支承环”。该理念被广泛应用于岩石工程,在工程界产生了广泛影响。随着隧道围岩与支护的相互作用理论的发展,隧道支护技术也从以传统棚式支护技术为核心的被动式支护发展到以锚杆支护技术为核心的主动式支护。为正确设计和应用锚杆支护,众多学者提出了悬吊作用、组合梁作用及组合拱作用等锚杆支护理论,这些理论以一定的假说为基础,从不同的角度阐述了锚杆支护的作用机理,虽然各有差异,但在锚杆支护强化了围岩这一结论上是一致的。

作为新型结构型式的小净距隧道,其围岩和支护共同体的受力特征和稳定性问题与分离式隧道相比远要复杂,设计时其支护结构形式一般考虑采用复合式衬砌,即初期支护采用锚喷支护,起到强化围岩强度的作用,促进围岩自稳,二次衬砌采用模筑混凝土,作为承载结构或者安全储备。而对小净距隧道支护结构的研究基本围绕着支护类型、支护参数、支护时机以及中岩柱的受力特征和加固措施等问题展开。万明富^[37]对小净距隧道岩柱受力特点进行分析指出,中岩柱侧壁必须及时施加足够的侧向约束,且无论岩石好坏,中岩柱初期支护都要配置钢筋网,以使预应力锚杆施加的压力能够更好地扩散。同时,对中岩柱围岩较差段必须进行注浆加固处理,以保证在两洞开挖之后初期支护和侧向约束施加之前,能有足够的稳定时间以支撑其顶部荷载。黄拔洲^[14]、杨转运^[24]、姚勇^[17]等,通过对不同级别围岩中间岩柱加固方式等进行有限元分析,指出软弱围岩必须通过注浆、对拉锚杆等对中间岩柱进行加固以确保中间岩柱的稳定,而对质量较好的围岩设计时只需要考虑加长锚杆,一般在系统锚杆基础上加长0.5~1 m即可。秦卫^[38]等认为,中间岩柱在4~6 m时宜采用直径为25 mm的水平对拉预应力锚杆进行加固,若地质条件差,可加设小导管对岩柱进行注浆加固;岩柱净距在6~10 m时宜用胀壳式低预应力锚杆进行加固,当地质条件较好时,可采用加长中空注浆锚杆或砂浆锚杆进行加固。刘明高等^[39]对小导管注浆、系统锚杆及水平贯通预应力锚杆三种应用比较广泛的岩柱加固技术进行了归纳,认为小导管注浆对提高低类别围岩力学参数效果明显,更多适用于低级别的围岩预加固,对高级别围岩选择系统锚杆加固技术较为合理,而水平贯通预应力锚杆可独立用于较好围岩。夏才初等^[40]针对大断面小净距隧道的特点,对福建省鹤上隧道进行地表下沉、围岩内部位移、拱顶下沉和衬砌内力等项目的监测工作,提出小净距隧道衬砌支护的最佳时机,并为支护体系的优化提供依据。杨建平等^[41]结合沪-蓉-西高速公路漆树槽分岔隧道小净距段的施工特点,开展了在不同荷载释放比例下支护时机对围岩稳定性影响的研究,认为支护越早衬砌和锚杆承担的荷载越大,围岩的塑性变形和塑性区范围越小。

综上可知,现有对小净距隧道支护方案的研究重点在中岩柱保护方面,一般认为中岩柱厚度较小稳定性较差,在施工中应加强对其保护,以最大限度地保证其完整性,提高开挖过程中围岩的自承自稳能力。然而,现有的研究基本建立在这样一个假设之上:一定的支护材料类型和参数与围岩体强度强化之间的定量关系是明确的,在此基础上研究小净距隧道整体支护效果与支护类型、支护参数及支护时机之间的关系。事实上,以相似材料模拟实验、原型试验、数值计算及解析理论等手段对锚杆支护机理的研究及认识尚未统一,锚固体强度强化的定量指标研究远未成熟,建立在强度强化定量关系上的隧道围岩-支护结构的支护效果研究是有缺陷的。另外,对小净距隧道围岩支护体系的设计,没有考虑不同部位围岩的受力特征,除中岩柱部位外,小净距隧道不同部位围岩的支护材料类型和参

数等都是相同的。实际上现有研究对中岩柱的划分范围是不明晰的,且除中岩柱部位外其他部位围岩的受力特征差异是较大的,支护参数应与此相适应,采用不同值,因此从围岩稳定性效果和经济合理性方面看,上述研究结论是有待商榷的。

(4) 其他因素

在小净距隧道围岩稳定性影响因素中,除净距问题、开挖问题及支护结构外,还有隧道断面形式与几何尺寸、隧道埋深、围岩级别等因素。其中的隧道断面形状及几何尺寸不仅决定了围岩应力的集中程度和衬砌结构的受力条件,也直接影响了隧道内净空利用率和隧道断面工程量。由于小净距隧道结构形式在近十年才在我国得到普遍应用,对小净距隧道断面优化问题的研究甚少,王辉等^[42]利用大型有限元分析软件 ABAQUS 对某拟建大跨度小净距隧道不同扁平率及其间距进行参数化设计,认为优化方案可以明显降低围岩变形,改善衬砌受力,提高围岩的稳定性。李之达^[43]利用数值模拟,对不同围岩等级下的仰拱设置进行了研究,结果表明在小净距隧道边墙下部为整体性好的Ⅲ级围岩时,不设置仰拱对围岩的稳定性和初衬、二衬的受力影响并不大,因此可以取消仰拱的设置,简化设计与施工。更多的研究主要集中在分离式独立隧道的断面优化上。曾宜江等^[44]通过对单拱四车道公路隧道断面的优化认为,扁平率应控制在 0.61~0.63 对单拱四车道公路隧道是合理的,这既能满足初期支护条件下围岩稳定性要求,又能提高隧道建设的经济效益。王飞^[45]认为大断面隧道的扁平率要控制在 0.6~0.7;镇亦明等^[46]通过对某隧道最大埋深地段不同断面形式引发的岩爆活动进行数值分析后认为,在相同的应力条件下,采用的断面形式不同,将会导致不同的岩爆结果。韩现民^[47]通过有限差分法(FLAC3D)数值计算和现场试验对马蹄形断面和大曲率边墙、似圆形断面形式下隧道的支护受力和围岩变形特征进行了对比分析,得出采用似圆形断面可以有效地控制围岩的变形量和变形速率,尤其是水平收敛变形。谷胜利^[48]利用 ESO 进行隧道断面形状优化时,认为误差面积和加权误差面积作为 ESO 优化效果评价的定量指标是可靠的。徐林生、孙钧^[49]借助于数值分析的方法,以洞周位移作为判断依据从理论上探讨了京珠高速公路粤境北段洋碰隧道断面形状的设计优化问题。吕爱钟^[50,51]以洞室周边的最大切向应力最小为最优准则,给出了利用复合形最优优化技术确定最优洞室形状的方法,在基于该准则所得的最优化洞室周边应力集中程度最小。

与其他影响因素相比,隧道埋深和围岩级别对小净距隧道围岩稳定性影响的研究则要成熟的多。总的来说,在其他工况条件相同的情况下隧道埋深越小及围岩质量越好则围岩稳定性越好。龚建伍^[52]认为不同级别围岩的拱顶下沉随净距增大而减小的程度是不同的,埋深小于 30 m 时隧道净距变化对拱顶下沉的影响非常显著,二者近似呈二次曲线关系,而埋深大于 30 m 时,隧道净距对拱顶下沉的影响相对较小,且拱顶下沉与隧道净距近似呈线性关系。另外,杜菊红^[53]通过分析认为,围岩条件越差隧道开挖后地层位移值越大,主要位移范围也相应增大;两洞之间的相互影响程度随着围岩级别降低而增大,围岩条件越差越要注意小间距隧道之间的相互影响。

1.2.2 小净距隧道围岩稳定性评价方法和指标研究

围岩稳定性评价一直是隧道工程理论研究和应用方面的基础性工作,是隧道工程研究中最受关注的问题之一,不少学者对此进行了较深入研究。对于公路隧道,最基础的评价

就是《公路隧道设计规范》（JTG D70 - 2004）中规定的，按隧道围岩基本质量指标（BQ）先进行分级，然后按表 1.1 对围岩自稳能力作出判断。对于铁路隧道，则《铁路隧道设计规范》（TB10003 - 2005、J449 - 2005）中规定了隧道稳定性可根据隧道施工实测位移 U 和隧道极限位移 U_0 进行判别。当 $U \leq U_0$ 时，隧道稳定；当 $U > U_0$ 时，隧道不稳定。

表 1.1 隧道各级围岩自稳能力判断

围岩类别	自稳能力
I	跨度 20 m，可长期稳定，偶有掉块，无塌方
II	跨度 10 ~ 20 m，可基本稳定，局部可发生掉块或小塌方； 跨度 10 m，可长期稳定，偶有掉块
III	跨度 10 ~ 20 m，可稳定数日 ~ 1 个月，可发生小—中塌方； 跨度 5 ~ 10 m，可稳定数月，可发生局部块体位移和小—中塌方； 跨度 5 m，可基本稳定
IV	跨度 5 m，一般无自稳能力，数日 ~ 数月内可发生松动变形、小塌方，进而发展为中—大塌方； 埋深小时，以拱部松动破坏为主，埋深大时，有明显塑性流动变形和挤压破坏； 跨度小于 5 m，可稳定数日 ~ 1 个月
V	无自稳能力，跨度 5 m 或更小时，可稳定数日
VI	无自稳能力

实际上隧道围岩稳定性评价方法和指标有很多，按涉及因素多少，可分为单因素评价和多因素评价两类；按评价方法，可分为定量评价和定性评价；按评价模型和所依托的理论，有以支护结构应力和强度关系评定围岩稳定性的应力体系理论、围岩松动圈理论、洞周位移判别准则以及地表位移准则等；从实现手段上，有数值计算、现场监控量测和理论计算等方法。目前，对于公路隧道围岩稳定性评价主要是依据规范分两阶段进行。第一阶段采用工程类比法，根据隧道所处的工程地质、水文地质、岩石物理力学参数及其他设计条件等，依据规范和工程经验对围岩作出质量评价，并据此进行隧道断面尺寸、开挖方法和支护方法等方面设计。第二阶段主要是在施工过程中，根据数值计算和现场监控量测结果的基础上，进行围岩稳定性评价，并对隧道支护参数和施工方法作修改和调整。

小净距隧道的后挖洞施工对先行洞围岩稳定性影响较大，其力学机理较独立隧道复杂，其稳定性评价方法和指标要综合考虑围岩级别、净距、埋深、开挖方案及支护方案等因素确定。然而，目前针对公路小净距隧道围岩稳定性评价方法和指标的研究较匮乏，通过查阅文献发现只有少量的利用单洞隧道围岩稳定性的评价方法和指标对小净距隧道围岩稳定性进行评价，因此本部分内容主要综述独立隧道的围岩稳定性评价指标和方法的研究和应用进展情况。

隧道围岩稳定性评价从其评价机理的角度可以分为两大类^[54-56]，一是基于材料力学、弹塑性力学知识体系的强度理论，以围岩应力状态和强度关系评定围岩稳定性，即强度判据，二是通过围岩周边容许位移（变形）或地表沉降量来判断，即位移判据。强度判据的一般思路为通过数值计算和监控量测等手段，获取隧道开挖后围岩应力分布状况后，与围岩自身具有的围岩强度进行比较并评价围岩稳定性。比较经典的强度判据有 Mohr-Cou-