

程选生 著

# 黄土隧道的施工方法与工程实践



科学出版社

# 黄土隧道的施工方法 与工程实践

程选生 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了不同断面黄土隧道的施工方法,基于有限元强度折减法,根据静力稳定安全系数,研究中断面、大断面和特大断面黄土隧道的施工方法,并将施工方法应用于牛头山黄土隧道和方家湾黄土隧道。全书共6章,主要内容包括绪论、黄土隧道的施工方法、中断面黄土隧道的施工方法、大断面黄土隧道的施工方法、特大断面黄土隧道的施工方法和黄土隧道动态施工实例。

本书可作为土木工程、水利水电工程等领域的工程设计、科学研究、施工技术人员和研究生等的参考书,也可供相关专业学者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

黄土隧道的施工方法与工程实践/程选生著. —北京:科学出版社,2019.6

ISBN 978-7-03-060018-9

I. ①黄… II. ①程… III. ①土质隧道-隧道工程-工程施工 IV. ①U459.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第294293号

责任编辑:亢列梅 张瑞涛/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年6月第一版 开本:720×1000 B5

2019年6月第一次印刷 印张:18 1/4

字数:368 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 作者简介



程选生 兰州理工大学教授，工学博士，博士研究生导师，国家一级注册结构工程师。1995年获郑州工学院工业与民用建筑专业工学学士学位，2001年获兰州大学固体力学专业工学硕士学位，2007年获兰州理工大学结构工程专业工学博士学位，2009年和2011年分别进入中国人民解放军后勤工程学院和北京工业大学土木工程博士后流动站从事博士后研究

工作，2012年国家公派赴美国西北大学访学一年。主要研究方向：①隧道结构的地震响应、动力稳定及其施工技术；②特种结构的液-固耦合振动及减隔震性能；③混凝土结构的热力学性能；④结构设计理论和方法。

国际隔震与消能减震控制学会（ASSISI）理事、国际土力学协会委员、中国力学学会计算力学委员会特邀委员、中国地震工程学会岩土防震减灾委员会委员、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会青年工作委员会委员、中国土木工程学会防震减灾工程技术推广委员会青年分委会委员。《Ocean Engineering》、《Engineering Geology》、《Structure and Infrastructure Engineering》、《建筑结构学报》等国内外20余种期刊审稿人。教育部学位中心通讯评议专家、科技部国家科技库专家、国家自然科学基金项目和中国博士后基金项目通讯评议专家、甘肃省震后房屋建筑应急评估专家，甘肃省装配式建筑专家委员会专家。

主持国家自然科学基金2项、教育部博士点基金（博导类）1项、甘肃省科技支撑计划项目1项、甘肃省建设科技攻关项目3项；参与国家“973计划”项目和教育部创新团队发展计划项目各1项。发表论文130余篇（SCI检索30余篇，EI检索46篇，ISTP检索10篇），出版专著3部、教材9部，授权发明专利13项，获甘肃省科技进步一等奖1项、三等奖3项，获甘肃省建设科技进步一等奖和二等奖各1项，获第16届甘肃省高等学校青年教师成才奖。

# 前 言

黄土的分布非常普遍，它广泛分布于中国、美国的中西部和俄罗斯的南部等许多地区，总面积约 1300 万  $\text{km}^2$ 。在我国，黄土地区总面积达 63.1 万  $\text{km}^2$ ，主要分布在陕西、山西、河南、甘肃、宁夏等 12 个省和自治区。近年来，随着西部大开发和国家“一带一路”倡议的实施，大量的黄土隧道正在建设或有待建设，因此，研究黄土隧道围岩结构的施工方法具有重要的理论意义和现实意义。

2009 年 5 月以来，作者有幸参与中铁二十一局集团有限公司天平铁路项目，当时该项目中黄土隧道正在施工，于是作者所在团队针对该项目中的黄土隧道，系统研究了各类断面形式下黄土隧道的施工方法。

全书共 6 章，第 1 章为绪论，介绍国内外研究现状及隧道断面的分类；第 2 章为黄土隧道的施工方法，介绍目前各类断面下黄土隧道常用的施工方法；第 3 章为中断面黄土隧道的施工方法，主要对中断面黄土隧道全断面开挖法、上下台阶法、台阶分部开挖法、CD 法等施工方法下的地表变形和拱顶下沉、控制点位移、安全系数及施工特点进行分析；第 4 章为大断面黄土隧道的施工方法，主要对大断面黄土隧道中台阶分部开挖法、单侧壁导坑开挖法、CD 开挖法、CRD 开挖法、双侧壁导坑开挖法的地表变形和拱顶下沉、控制点位移等进行分析；第 5 章为特大断面黄土隧道的施工方法，主要对 CD 法、CRD 法、单侧壁导坑法、双侧壁导坑法、三台阶七步开挖法等施工方法的围岩位移及安全系数进行分析；第 6 章为黄土隧道动态施工实例，主要分析了天平铁路隧道施工中的黄土隧道，包括牛头山黄土隧道和方家湾黄土隧道。

编写本书过程中得到了博士研究生周欣海、硕士研究生王建华、岳才权、刘超、付雪东等的支持，在此向他们表示衷心的感谢；另外，参考了很多国内外专家和同行学者的论文及专著，在此同样对他们表示感谢！

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(51478212)、教育部博士点基金项目(博导类)(20136201110003)和中铁二十一局集团有限公司的支持，在此表示衷心的感谢。

限于作者水平，本书难免有不足之处，欢迎广大读者批评指正。

程选生

2019 年 6 月于兰州

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 黄土隧道施工方法	2
1.3 黄土隧道国内外研究现状	3
1.3.1 黄土隧道开挖方法的研究现状	3
1.3.2 黄土隧道地震作用下稳定性的研究现状	4
1.4 隧道断面的分类	5
1.5 本书的主要内容	6
参考文献	6
第 2 章 黄土隧道的施工方法	8
2.1 概述	8
2.2 全断面开挖法	10
2.3 台阶法	11
2.4 单侧壁导坑法	13
2.5 中隔壁法	13
2.6 交叉中隔壁法	15
2.7 双侧壁导坑法	16
2.8 环形开挖预留核心土法	17
2.9 本章小结	19
参考文献	19
第 3 章 中断面黄土隧道的施工方法	21
3.1 概述	21
3.2 基本理论	22
3.2.1 中断面黄土隧道概述	22
3.2.2 抗剪强度折减法及收敛准则	22
3.2.3 一致边界条件	24
3.2.4 屈服条件和破坏准则	26
3.2.5 弹性常数对地震动安全系数的影响	27
3.3 计算模型及参数	29

3.3.1	计算模型	29
3.3.2	计算参数	29
3.4	模拟过程及结果分析	30
3.4.1	全断面开挖法	30
3.4.2	上下台阶法	32
3.4.3	台阶分部开挖法	37
3.4.4	CD法	44
3.5	安全系数	56
3.5.1	全断面开挖法	56
3.5.2	上下台阶法	58
3.5.3	台阶分部开挖法	60
3.5.4	CD法	63
3.6	结果比较	65
3.7	本章小结	66
	参考文献	66
<b>第4章</b>	<b>大断面黄土隧道的施工方法</b>	<b>68</b>
4.1	概述	68
4.1.1	分析模型	68
4.1.2	计算采用的准则	69
4.1.3	计算参数	69
4.1.4	计算步骤和控制点	69
4.2	台阶分部开挖法的动态数值模拟	70
4.2.1	上部弧形导坑开挖计算结果及分析	70
4.2.2	核心土开挖后计算结果及分析	73
4.2.3	下部台阶开挖后计算结果及分析	75
4.2.4	开挖结束后控制点位移	77
4.3	单侧壁导坑开挖法的动态数值模拟	78
4.3.1	先行导坑上部开挖计算结果及分析	78
4.3.2	先行导坑下部开挖计算结果及分析	81
4.3.3	后行洞上部开挖计算结果及分析	83
4.3.4	后行洞下部开挖计算结果及分析	85
4.3.5	临时支撑拆除后开挖计算结果及分析	87
4.3.6	开挖结束后控制点位移	90
4.4	CD开挖法的动态数值模拟	90
4.4.1	先行导坑上部开挖计算结果及分析	91
4.4.2	先行导坑下部开挖计算结果及分析	93

4.4.3	后行洞上部开挖计算结果及分析	95
4.4.4	后行洞下部开挖计算结果及分析	97
4.4.5	临时钢支撑拆除后计算结果及分析	100
4.4.6	开挖结束后控制点位移	102
4.5	CRD 开挖法的动态数值模拟	102
4.5.1	先行导坑上部开挖计算结果及分析	103
4.5.2	先行导坑下部开挖计算结果及分析	105
4.5.3	后行洞上部开挖计算结果及分析	107
4.5.4	后行洞下部开挖计算结果及分析	109
4.5.5	临时钢支撑拆除后计算结果及分析	112
4.5.6	开挖结束后控制点位移	114
4.6	双侧壁导坑开挖法的动态数值模拟	114
4.6.1	先行导坑开挖后计算结果及分析	114
4.6.2	后行导坑开挖后计算结果及分析	117
4.6.3	中部上半断面开挖后计算结果及分析	119
4.6.4	中部下半断面开挖后计算结果及分析	121
4.6.5	临时钢支撑拆除后计算结果及分析	124
4.6.6	开挖结束后控制点位移	126
4.7	本章小结	126
	参考文献	127
第 5 章	特大断面黄土隧道的施工方法	128
5.1	概述	128
5.2	计算模型的建立	128
5.2.1	计算模型	128
5.2.2	单元选择	129
5.2.3	网格划分	129
5.2.4	计算参数	130
5.2.5	加载与求解	130
5.3	计算结果及结果分析	132
5.3.1	CD 法	132
5.3.2	CRD 法	149
5.3.3	单侧壁导坑法	166
5.3.4	双侧壁导坑法	179
5.3.5	三台阶七步开挖(预留核心土)法	202
5.3.6	三台阶七步开挖(预挖核心土)法	221
5.4	安全系数	240

5.4.1	CD 法	240
5.4.2	CRD 法	241
5.4.3	单侧壁导坑法	243
5.4.4	双侧壁导坑法	244
5.4.5	三台阶七步开挖(预留核心土)法	245
5.4.6	三台阶七步开挖(预挖核心土)法	246
5.4.7	安全系数	248
5.4.8	开挖结束后控制点位移	248
5.5	本章小结	248
	参考文献	249
<b>第 6 章</b>	<b>黄土隧道动态施工实例</b>	<b>250</b>
6.1	概述	250
6.2	牛头山黄土隧道动态施工数值仿真	251
6.2.1	分析模型	251
6.2.2	计算参数	251
6.2.3	模拟过程及结果分析	251
6.2.4	安全系数	257
6.3	方家湾黄土隧道动态施工数值仿真	259
6.3.1	分析模型	259
6.3.2	计算参数	260
6.3.3	模拟过程及结果分析	260
6.3.4	施工结束后控制点位移	278
6.3.5	安全系数	278
6.4	本章小结	279
	参考文献	280

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

进入 21 世纪, 地下工程建设任重道远, 在我国公路建设中, 越岭长隧道成为不可或缺的组成部分。由于其具有缩短线路、改善线形、保护环境等多种优点, 越岭长隧道在各类运输方式中有着不可替代的作用。

隧道工程广泛应用于铁路、公路、矿井和水利等工程建设的诸多领域。根据用途, 可以将隧道分为铁路隧道、公路隧道、煤炭和金属等矿山运输的巷道和洞室、水工隧道、军工工程和人民防空用地下通道和洞库、市政隧道和窑洞等。隧道工程结构由人工衬砌和天然围岩共同构成, 围岩是主要承载体。由于在地质作用下形成的历史时期不同, 可以将天然围岩分为岩体围岩和土体围岩。在工程建设高速发展的时代, 隧道结构工程面临着重大的机遇和挑战, 岩体围岩隧道和土体围岩隧道建设均取得迅猛发展。

气候环境的变化促使黄土的形成。黄土广泛分布于中国、美国的中西部和俄罗斯的南部等世界许多地区, 总面积约 1300 万  $\text{km}^2$ , 占陆地面积的 9.3%。我国黄土地区总面积达 63.1 万  $\text{km}^2$ , 主要分布在陕西、山西、河南、河北、山东、内蒙古、辽宁、吉林、新疆、青海、甘肃、宁夏等 12 个省和自治区, 占我国国土面积的 6.6% 左右, 其中黄土最厚的区域在黄河支流——泾河与洛河流域的中游甘陕地区<sup>[1]</sup>。黄土可分为老黄土和新黄土。老黄土由早更新世的午城黄土( $Q_1$ )和中更新世的离石黄土( $Q_2$ )组成, 一般不具有湿陷性。新黄土由晚更新世马兰黄土( $Q_3$ )和全新世的新近堆积黄土( $Q_4$ )组成, 都具有湿陷性。随着我国交通建设的迅速发展和西部大开发的不断深入, 黄土围岩隧道已经成为土体围岩隧道的重要组成部分, 并广泛应用于铁路、公路、城市地下工程、水利、矿山建设、军事和人防等工程建设之中。

改革开放 40 年来, 公路建设迅猛发展, 高等级公路的快速发展, 更使得公路中隧道的数量与规模迅速增加, 施工技术也日益成熟。随着西部大开发战略的实施, 我国西部地区的公路网路建设初具规模, 但与东南地区的交通网络相比仍有较大差距。由于黄土分布的广泛性和典型的工程特性, 想要弥补这一差距, 就不得不考虑提高黄土隧道的施工技术。黄土结构较为松散, 且遇水迅速失去强度, 因而受到学术界及工程界的广泛重视。我国黄土隧道的修建起步较晚, 基本借鉴了铁路隧道在此方面已有的科研成果, 《铁路工程设计手册》规定, 对黄土区浅埋隧道围岩压力

采用谢家杰公式进行计算,而深埋隧道采用修正卡柯公式进行计算,并指出对黄土区隧道不宜按计算摩擦角或围岩类别确定隧道围岩压力,应根据实测的黄土物理力学指标进行设计<sup>[2,3]</sup>。黄土隧道,特别是大跨径、大断面隧道,其防水等级较高,面对黄土强度较低的情况时是否应该在施工时考虑开挖扰动变形大的特点?黄土隧道广泛采用的两层衬砌中每个组成部分的荷载特性如何?黄土隧道施工与其结构形式及参数选取有何关联?现有的设计施工方法合理性及经济性如何?一系列的问题都值得工程界及学术界研究探讨。本书将针对以上亟待解决的问题,介绍作者多年来的相关研究成果及研究思路。

## 1.2 黄土隧道施工方法

隧道施工方法包括开挖与支护(即支撑)等工序。隧道施工过程通常包括:在地层内挖出土石,形成符合设计断面的坑道,进行必要的支护和衬砌,控制坑道围岩变形,保证隧道的施工安全和长期使用<sup>[4]</sup>。

现行国内外规范已经给出了一些关于大断面黄土隧道施工方法的建议。《公路隧道施工技术规范》(JTJ 042—94)<sup>[5]</sup>、《客运专线铁路隧道工程施工技术指南》(TZ 214—2005)的建议为:对于围岩情况较好的大断面隧道,不宜采用全断面开挖;根据隧道断面的大小与埋深,黄土隧道的施工应采用双侧壁导坑法、环形开挖预留核心土法(弧形导坑法)、中隔壁法等分部开挖;黄土隧道施工中应遵循“管超前、短进尺、强支护、早封闭、勤量测”原则。1996年制定的《日本公路隧道安全施工技术指南》的建议为:大断面开挖场合,可采用台阶环形开挖;比较大的断面中抑制地表下沉时可采用侧壁超前导坑;浅埋大断面必须抑制地表下沉时可采用CD工法。

应当注意的是,黄土隧道工程的施工是在应力土体中开拓地下空间。地质条件的复杂多变以及地质勘探及施工技术的局限,使得黄土隧道施工中往往会遇到突然变化的地质条件,如意外塌方及涌水等问题。一方面,应综合考虑黄土隧道工程的各方面条件,考虑多种方法和多种技术的综合利用,通过反复对比并选出合理的施工方案;另一方面,应在施工中严格控制各种因素的变化,尤其是湿陷沉降的变化,及时调整施工方案、施工技术、施工方法等。

科学技术的不断改进和世界经济水平的进一步发展,对隧道的施工质量和技术难度提出了更高的要求,尤其是我国近年来大规模的地下工程、公路(铁路)隧道的修建,极大地促进了施工技术的进步。由于工程实践经验的不断提升,岩石力学不断发展,从而建立了现代支理论,也因此产生了新奥法、挪威法及浅埋暗挖法等施工方法。机械工业水平的提升,盾构机和掘进机的进一步发展,适应了从坚硬地层到软土含水层的各类地形条件。随着军民融合发展上升为中国国家战略,一些新

型爆破器材及爆破技术应用于隧道施工,使得隧道施工环境和施工掘进速度得到了改善。另外,沉管隧道施工技术的发展,为穿越江河、海湾提供了新的有效手段。

### 1.3 黄土隧道国内外研究现状

地下工程涉及多门交叉学科,具有学科的复杂性、边缘性和系统性等特点。围岩结构是否破坏或产生过大的变形决定了这类结构的稳定性。对于地下工程结构的断面开挖方法的研究以及围岩稳定性研究至今已有近百年的历史。随着工程建设的飞速发展和西部大开发的顺利推进,各种形式的地下工程在黄土地区已经建成或正在建设。为了比较全面地研究黄土隧道结构的稳定性,定量估计黄土地段的隧道稳定性,一方面要全面了解目前国内外学者关于黄土隧道开挖方法的研究现状;另一方面要全面了解目前国内外学者关于黄土隧道地震作用下稳定性的研究现状。

#### 1.3.1 黄土隧道开挖方法的研究现状

目前,邵生俊等<sup>[6]</sup>结合湿陷性黄土隧道的工程特点,针对隧道施工过程中围岩稳定性和湿陷变形对衬砌结构影响的两个重要问题,相应地提出了隧道地基湿陷性变形的评价方法和围岩压力的确定方法,利用太沙基公式计算隧道围岩压力,得到了围岩压力随黄土构度的变化关系。石磊等<sup>[7]</sup>通过量测数据分析,比较了双侧壁导坑、单侧壁导坑和三台阶开挖施工工法在大断面黄土隧道中的适用性及优缺点。张英才等<sup>[8]</sup>针对大断面黄土隧道探索分析了交叉中隔壁法、短台阶七步法和双侧壁导坑法的优缺点。宋冶等<sup>[9]</sup>结合郑西客运专线及大断面黄土隧道施工监测,通过对10座大断面黄土隧道测试资料的统计分析和现场试验研究,给出了客运专线大断面黄土隧道施工监测项目、监测手段和方法以及控制基准值。苏杰等<sup>[10]</sup>通过分析现场监控量测数据,总结大断面湿陷性黄土隧道施工中CRD法、环形开挖预留核心土法、双侧壁导坑法等适用范围,并指出各自的具体施工工艺、质量控制要点和围岩的变形规律及隧洞内基底湿陷性处理措施。刘赓<sup>[11]</sup>结合郑西客运专线大断面黄土隧道设计、施工及科研情况,从沉降变形控制、施工进度、机械配套等方面对双侧壁导坑法、CRD法、CD法、环形开挖预留核心土法等4种工法进行了比选分析,提出了与不同工况相适应的工法以及施工要点。李波等<sup>[12]</sup>针对大断面黄土隧道的工法适用性问题,依托郑西客运专线陕西境内秦东、潼洛川和高桥等隧道,开展大断面黄土隧道中的CRD法、双侧壁导坑法、CD法、留核心土台阶法及双层支护台阶法5种试验工法的试验,通过现场试验测试及数据分析,研究不同试验工法下的力学特性和变形特征。总结其变形特征为垂直位移显著,变形受封闭距离与支护刚度影响明显;分析对地表沉降的控制效果,受力特征分析显示型钢受压明显而锚杆受力较小;得到不同埋深下的围岩压力特征曲线;接触压力测试显示刚度大的双层支护较单层支护小。最后对不同试验工法的适用性进行综合评价。杨建民<sup>[13]</sup>依托郑州至西

安高速铁路大断面黄土隧道工程实例,通过对三种常用工法的理论分析,并结合现场初期支护下沉收敛、地表沉降的监测,对比分析各种工法的优缺点,提出适用于高速铁路大断面黄土隧道安全快速的开挖方法。胡晋川等<sup>[14]</sup>结合离军高速公路黄土连拱隧道,通过现场监测并采用有限元方法分析,研究了黄土连拱隧道三导洞法施工的围岩变形规律和影响因素;证明了三导洞施工法开挖中、左右导洞和断面开挖时,围岩应力一直处于重新调整中,围岩变形也在不断变化,且施工中开挖顺序对围岩变形有很大影响,在洞室开挖施工中,要密切注意拱腰及拱顶的变形情况,加强Ⅴ类周岩监测,及时进行临时支护,尽早完成右洞初期支护以防变形过大而围岩失稳,并指出影响黄土隧道围岩变形的主要因素是黄土的工程特性和地质工程环境。扈世民等<sup>[15]</sup>以兰渝铁路胡麻岭隧道为工程背景,通过三维数值模拟结合典型断面现场监测,对铁路大断面黄土隧道初期支护的受力与变形特性进行综合研究,结果表明:数值计算与现场实测结果基本吻合,黄土地区隧道施工应坚持“及时支护、及早封闭”原则,确保开挖后围岩变形的稳定。倪玉山等<sup>[16]</sup>进行黄土隧道围岩不同开挖与支护施工方案的数值分析,对黄土隧道围岩采用中壁法和双侧壁导坑法开挖各3种不同支护顺序分别进行了模拟计算,考察了各个施工工序地表最大沉降量、隧洞拱顶最大下沉量、围岩塑性区分布、衬砌单元弯矩以及岩体总应变能变化。李骏等<sup>[17]</sup>在已建黄土隧道场地开展大面积试坑浸水试验,研究表明隧道开挖扰动了黄土围岩原有结构,改变了深层黄土的湿陷变形特性,遭浸水作用后产生较原位土层湿陷变形更大的沉降变形。仰拱中部地基的弹性抗力抑制中部沉降变形发展,显著的不均匀沉降差导致仰拱中部开裂,形成纵向裂缝。王维富等<sup>[18]</sup>提出三台阶临时仰拱+竖向支撑的开挖工法,对施工各阶段隧道-围岩体系的应变-应力进行模拟分析,对台阶法施工过程中出现的拱顶沉降大、初期支护出现裂缝、爆破对软硬不均地段的影响和地表土体开裂等问题进行分析并提出相应的对策。刘元雪等<sup>[19]</sup>结合该工程实际,进行黄土连拱隧道的关键施工力学问题研究:正洞上下台阶法与侧壁导洞法施工方案比较研究,先左洞(靠山一侧)施工方案和先右洞施工方案的对比,计算结果表明对于偏压黄土连拱隧道应采用先开挖靠山一侧的侧壁导洞法进行施工。钟祖良等<sup>[20]</sup>为研究合理的黄土连拱隧道仰拱一次性开挖长度,减少工程灾害和加快施工进度,先后通过力学机理分析、有限元模拟和模型试验,分析了不同的仰拱一次性开挖长度对地表沉降、洞周附加水平位移和中隔墙的受力影响,提出了最佳黄土仰拱一次性开挖长度,并将其应用于黄土连拱隧道的施工。张亚果等<sup>[21]</sup>根据太中银铁路大断面黄土隧道地质特点,采用环形开挖预留核心土法和三台阶法进行隧道开挖,分别介绍了施工工序、隧道初期支护、二衬、施工防排水和沉降变形控制等技术。

### 1.3.2 黄土隧道地震作用下稳定性的研究现状

国内外学者关于黄土隧道地震作用下的稳定性做了如下研究:高峰等<sup>[22]</sup>对某隧道洞口段进行了地震模拟分析,研究了边界约束条件、地震激振方向、隧道周围介

质的阻尼常数、横向边界计算范围、抗震缝等因素对隧道地震反应的影响,为今后相关的研究工作提供了借鉴。朱镜清等<sup>[23]</sup>研究了海底隧道体系在地震动作用下的反应分析方法,研究了海水的影响,给出了考虑海水作用的阻尼矩阵。张小玲等<sup>[24,25]</sup>以ADINA 软件为平台,对地震作用下海底管线的动力响应以及管线周围土体的孔隙水压力变化规律进行分析,讨论不同的管线半径、管线壁厚和上行参数对计算结果的影响,同时分析了海底管线周围海床土体中的超孔隙水压力及其变化规律,并在此基础上进行了瞬时液化分析。考虑非线性波浪的作用,栾茂田等<sup>[26]</sup>研究了埋置于海底的管线和透水海床的相互作用,研究显示非线性波浪的作用不容忽视。陈向红等<sup>[27]</sup>利用ANSYS 软件分析了不同地震激励方向和埋深条件下动水压力的变化规律与隧道衬砌的振动响应规律:当地震激励中含有竖向分量时,动水压力对浅埋海底隧道的内力影响较大,分析时不容忽略;当隧道埋深超过一定值后,可以忽略结构的地震反应变化。彭海阔等<sup>[28]</sup>对沉管隧道的地震响应进行了数值模拟,结果表明只有水平地震时,动水压力对沉管隧道的影响不大;当含有竖向地震分量时,动水压力影响较大,同时水深对动水压力和结构内力的影响较大。Anastasopoulos 等<sup>[29]</sup>对希腊某埋深70m 的沉管隧道进行了强地震作用下的非线性动力响应分析,研究表明管段之间的净拉力和过大变形可以通过施加恰当的垫片和较短的管段长度避免。Hasheminejad 等<sup>[30]</sup>对带阻尼的圆形隧道进行了隔震研究,结果表明:具有较低剪切模量的隔震材料可以显著地降低地震响应。

台阶分部开挖法(又称环形开挖预留核心土法)是目前黄土隧道施工较完整的方法。此方法用超前管棚支护、钢拱支撑、挂网、打锚杆等来加强土体强度及限制围岩应力重新分布,并结合喷射混凝土及时封闭开挖面,实施短开挖、快循环来减少对土体的扰动。此方法可以有效地解决黄土中开挖隧道的大变形和坍塌问题。

## 1.4 隧道断面的分类

如何区分大断面隧道与小断面隧道存在着不同的标准。日本的划分标准和国际隧道协会的标准都是以净空断面积划分的<sup>[31]</sup>,分别见表1-1和表1-2。

表1-1 日本的隧道断面划分标准

断面	净空断面积/m <sup>2</sup>	说明
标准断面	70~80	双车道
大断面	100~140	有行人的双车道隧道
超大断面	> 140	与路面宽相同的三车道

表 1-2 国际隧道协会隧道断面划分标准

断面	净空断面积/m <sup>2</sup>
超小断面	< 3
小断面	3~10
中等断面	10~15
大断面	50~100
超大断面	> 100

## 1.5 本书的主要内容

根据国内外技术现状,黄土隧道的动态施工方法研究关系到隧道的稳定问题,而不同的隧道断面对应不同的施工方法。目前的对应研究主要以两种方法为主,一种是开展原位大型试验,另一种是通过数值模拟进行分析。原位大型试验可以得到较为精确的实验数据,但其耗时长、费用高,通过数值模拟可以很好地弥补这些缺点。本书主要介绍数值模拟的基本理论和目前广泛采用的施工方法,并通过数值分析对比中断面、大断面和特大断面施工方法,研究不同断面黄土隧道的最优断面开挖施工方法。对于中断面隧道,主要针对全断面开挖法、上下台阶法、台阶分部开挖法和 CD 法进行数值分析对比;对于大断面隧道,主要针对模拟台阶分部法、单侧壁导坑法、CD 法、CRD 法和双侧壁导坑法进行数值分析对比;对于特大断面隧道,主要针对 CD 法、CRD 法、单侧壁导坑法、双侧壁导坑法、三台阶七步开挖(预留核心土)法和三台阶七步开挖(预挖核心土)法这六种开挖方法进行数值分析。同时,利用强度折减法给出了各个施工开挖方法围岩的稳定安全系数,进一步进行了校核。通过比较隧道在各种开挖方法下控制性节点位移大小对开挖方法进行优化选择,以期达到选取最优方法进行开挖使隧道周边位移达到最小,从而为施工方法的选择提供参考的目的。最后,对天平铁路 TJ-1 标段的中断面隧道(牛头山黄土隧道)和特大断面隧道(方家湾黄土隧道)进行动态施工方法的数值仿真,并且分析稳定安全系数。

### 参 考 文 献

- [1] 李智佩. 中国北方荒漠化形成发展的地质环境研究[D]. 西安: 西北大学, 2006.
- [2] 康军. 黄土公路隧道设计与施工技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [3] 赵占厂, 谢永利. 黄土公路隧道结构设计与施工中的若干问题[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(6): 56-60.
- [4] 王道远. 隧道施工技术[M]. 北京: 水利水电出版社, 2014.
- [5] 中交第一公路工程局有限公司. 公路隧道施工技术规范(JTJ 042—94) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [6] 邵生俊, 杨春鸣, 焦阳阳, 等. 湿陷性黄土隧道的工程性质分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9):

- 1580-1590.
- [7] 石磊, 侯小军, 武进广. 大断面黄土隧道施工工法研究[J]. 隧道建设, 2013, 33(3): 173-178.
- [8] 张英才, 胡国伟, 辛振省. 大断面黄土隧道开挖工法对比分析与选择[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(3): 87-92.
- [9] 宋冶, 王新东, 王刚. 客运专线大断面黄土隧道施工监控技术[J]. 铁道工程学报, 2010, 1: 52-58.
- [10] 苏杰, 张教才, 姚永波. 浅谈大断面湿陷性黄土隧道施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2010, 9: 104-109.
- [11] 刘赫. 郑西客运专线大断面黄土隧道施工方法研究[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(6): 10-17.
- [12] 李波, 宋冶, 师亚龙, 等. 大断面黄土隧道不同试验工法下的力学特性及变形特征研究[J]. 隧道建设(中英文), 2015, 35(6): 508-513.
- [13] 杨建民. 大断面黄土隧道施工方法分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(10): 86-92.
- [14] 胡晋川, 谢永利, 杨晓华, 等. 黄土连拱公路隧道围岩变形监测和数值分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 34: 101-105.
- [15] 扈世民, 张顶立, 王梦恕. 铁路大断面黄土隧道初期支护作用效果[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(1): 19-23.
- [16] 倪玉山, 张华兵. 黄土隧道施工方案的数值分析[J]. 岩土力学, 2006(S1): 22-26.
- [17] 李骏, 邵生俊, 李国良, 等. 黄土隧道的湿陷变形规律及其对衬砌结构的作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, (1): 251-260.
- [18] 王维富, 梅竹. 台阶法在超大断面浅埋偏压隧道中的应用研究[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(12): 1578-1584.
- [19] 刘元雪, 蒋树屏, 赵尚毅. 浅埋黄土连拱隧道施工方案优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 944-947.
- [20] 钟祖良, 刘新荣, 袁飞, 等. 仰拱一次性开挖长度对黄土连拱隧道稳定性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 462-466.
- [21] 张亚果, 姚占虎. 太中银铁路大断面黄土隧道施工技术[J]. 国防交通工程与技术, 2010, 8(5): 44-50.
- [22] 高峰, 李德武. 隧道三维地震反应分析若干问题的研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 4: 51-56.
- [23] 朱镜清, 周建. 海底隧道体系地震反应分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 1992, 2: 90-98.
- [24] 张小玲, 栾茂田, 郭莹, 等. 地震荷载作用下海底管线的动力反应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, S2: 3798-3806.
- [25] 张小玲, 栾茂田, 郭莹. 海底管线周围海床瞬时液化的数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 2: 165-171.
- [26] 栾茂田, 曲鹏, 杨庆, 等. 非线性波浪作用下海底管线-海床动力响应分析[J]. 岩土力学, 2007, S1: 709-714.
- [27] 陈向红, 张鸿儒. 暗挖海底隧道地震动水压力响应分析[J]. 北京交通大学学报, 2012, 1: 36-40.
- [28] 彭海阔, 孟光, 丁麒, 等. 在地震激励下动水压力对沉管隧道的影响[J]. 上海交通大学学报, 2008, 6: 1027-1031.
- [29] ANASTASOPOULOS I, GEROLYMOS N, DROSOS V, et al. Nonlinear response of deep immersed tunnel to strong seismic shaking[J]. American Society of Civil Engineers, 2007, 133(9): 1067-1090.
- [30] HASHEMINEJAD S M, MIRI A K. Seismic isolation effect of lined circular tunnels with damping treatments[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(3): 305-319.
- [31] 欧阳院平. 高速铁路大断面黄土隧道施工数值模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.

## 第2章 黄土隧道的施工方法

### 2.1 概 述

围岩工程地质条件,即隧道所处的地下建筑环境条件,主要包括围岩的自稳能力、抗扰动能力、抗破坏能力、地应力大小、地温、地下水文条件等。隧道工程结构条件主要包括隧道形状、长度、洞室组合形式、断面大小以及支护结构的类型等。隧道施工条件主要包括施工对围岩的扰动、支护对围岩的限制有效性、施工队伍对空间要求、施工人员的技术素质、施工队伍的管理水平等。

隧道施工方法主要根据围岩工程地质条件、隧道工程结构条件、隧道施工条件三个方面来选择,从工程技术角度来看,隧道围岩的工程地质条件和水文地质条件是影响施工方法选择的关键因素。针对具体的隧道工程,不但要考虑围岩工程地质条件和水文地质条件,而且应考虑隧道的结构条件和施工条件。所选的施工方法,不但要与围岩的自稳能力及被挖土体的坚硬程度相适应,而且要尽量减少对围岩的扰动,利用围岩的自稳能力保持围岩稳定<sup>[1]</sup>。另外也要适应隧道长度、断面大小和形状,并满足施工安全、作业空间、施工速度、施工成本、环境保护和工程质量方面的要求。

目前,针对黄土隧道的施工方法主要有矿山法、新奥法、盾构法、TBM掘进机等,其中新奥法是近十几年发展起来的一种新方法,在黄土区隧道施工中得到了广泛运用,多用于第四纪软土地层,开挖方法有正台阶法、单侧壁导坑法、中隔壁(center diaphragm, CD)法、交叉中隔壁(cross diaphragm, CRD)法、双侧壁导坑法(眼镜工法)等<sup>[2]</sup>。新奥法具有灵活多变,对地面建筑、道路和地下管网影响不大,拆迁占地少、不扰民、不污染城市环境的特点,是目前较为先进的施工方法。当采用新奥法施工时,常依据工程规模、工程地质、覆土埋深、施工条件及水文情况等影响因素,采用全断面开挖法、台阶法、中隔壁法、交叉中隔壁法、单侧壁导坑法、双侧壁导坑法(眼镜工法)等施工方法。本书将在后面通过数值模拟详细分析适用于中断面、大断面、特大断面的各类施工方法。中洞法作为矿山法的一种,具有安全性高、灵活性好、出土效率高、可操作性强、机械化程度低、工序间干扰较少、造价低和经济性强等特点,适用于地质条件较好且施工受地下水影响较小的黄土隧道<sup>[3]</sup>。黄土隧道常用施工方法的适用范围及施工要求如表 2-1 所示<sup>[4]</sup>。