

刘新荣
钟祖良

著

黄土公路连拱隧道



科学出版社

黄土公路连拱隧道

刘新荣 钟祖良 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对我国公路黄土连拱隧道的支护参数选择、隧道开挖方案设计、中隔墙选形与地基加固以及防排水系统设计等进行了系统深入的研究,为我国公路黄土连拱隧道的修建提供了理论依据及施工参考。主要内容包括黄土的基本物理力学性质及其本构模型、黄土连拱隧道现场监控量测和参数反分析技术、黄土连拱隧道大型物理模型试验、黄土连拱隧道施工方案优化和空间力学效应分析、黄土连拱隧道的中隔墙形式及合理厚度选择,以及黄土连拱隧道设计与施工关键技术等。

本书可作为土木工程、勘查技术与工程、城市地下空间工程等专业本科生和研究生的教材或教学参考书,也可供从事黄土力学和隧道工程建设的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土公路连拱隧道/刘新荣,钟祖良著. —北京:科学出版社,2016
ISBN 978-7-03-049245-6

I. ①黄… II. ①刘…②钟… III. ①黄土区-公路隧道-拱形隧道-隧道工程 IV. ①U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 144275 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 倩 / 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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张:23 3/4

字数:479 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

黄土古称“黄壤”，本源于土地之色，是一种第四纪沉积物，具有独特的工程性质，这种独特性除了表现在它的地质特征，微观结构特征以及其他物理性质以外，从岩土工程意义来说，最主要是它的力学性质，特别是其结构性、欠压密性和湿陷性。黄土在世界上分布较广，如美国中西部、俄罗斯南部和澳大利亚等均有分布。我国分布的黄土面积约为 60 多万 km^2 ，占国土面积的 6.3%。其中，在黄河中游地区，西起贺兰山，东到太行山，北起长城，南到秦岭几乎全部都被黄土覆盖，是我国黄土的主要分布地区。我国西北地区黄土地层最厚，最完整，发育好，地层全，分布连续，其特性较典型，多为具有结构性强、压缩性小和弱湿陷性等独特工程性质的黄土。

近年来随着西部大开发战略的实施，交通工程修建得到蓬勃发展，涌现出大量的黄土隧道工程，这些黄土隧道工程从小跨度、小空间向大跨度、大空间方向发展，结构类型也变得更加复杂，再加上地形条件等的限制，出现了黄土公路连拱隧道结构形式。由于当时黄土公路连拱隧道设计和施工经验及相关规范规程较少，2003 年交通部为了满足修订公路工程标准的需要，设立相关科研课题，依托我国首条黄土公路连拱隧道工程——山西离石黄土连拱隧道，采用理论分析、室内试验、数值模拟和现场监测等多种方法，对黄土的物理力学性质和本构模型、施工方案优化和中隔墙形式及其合理厚度、黄土公路连拱隧道的设计、施工关键技术等进行了系统深入的研究，取得了一系列研究成果，经济效益和社会效益良好。

本书的主要内容包括：第 1 章，绪论；第 2 章，黄土的基本特征及围岩分级；第 3 章，黄土连拱隧道信息化施工监控量测；第 4 章，黄土连拱隧道围岩参数的位移反分析；第 5 章，黄土连拱隧道相似模型试验研究；第 6 章，黄土连拱隧道施工方案优化研究；第 7 章，黄土连拱隧道中隔墙形式及最小厚度分析；第 8 章，黄土连拱隧道施工过程的空间效应分析；第 9 章，黄土连拱隧道动态施工损伤局部化研究；第 10 章，黄土连拱隧道设计与施工关键技术。

本书是在国家自然科学基金(51108485)、交通部公路工程标准制修订项目子专题“黄土连拱隧道信息化施工力学与围岩稳定性测试研究”、教育部“新世纪优秀人才支持计划”基金“浅埋偏压连拱隧道动态施工损伤局部化与施工力学效应的研究”、吕梁汾柳高速公路建设有限公司的横向科研项目“离石连拱隧道监控量测研究”等的联合资助下完成的，在此表示诚挚的感谢。

本书在研究和撰写过程中,重庆大学土木工程学院刘新荣教授课题组孙辉、陈晓江、胡丽霞和袁飞等,以及招商局重庆交通科研设计院有限公司副总工程师黄伦海研究员、后勤工程学院刘元雪教授等付出了辛勤劳动。

本书的研究内容得到了山西省交通规划勘察设计院聂承凯院长、招商局重庆交通科研设计院有限公司首席专家蒋树屏研究员、山西省交通规划勘察设计院黄仰收副院长、吕梁汾柳高速公路建设有限公司姚惠发总经理、董占文总工程师,重庆大学李通林教授、邱贤德教授等的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 连拱隧道的特征及适用范围	1
1.1.1 连拱隧道及其特征	1
1.1.2 连拱隧道的优缺点	1
1.1.3 连拱隧道的适用范围	2
1.2 黄土公路连拱隧道修建技术研究现状	3
1.2.1 黄土隧道研究现状	3
1.2.2 黄土连拱隧道研究现状	4
1.3 黄土公路连拱隧道修建技术展望	6
第 2 章 黄土的基本特征及围岩分级	8
2.1 黄土的地质特征	8
2.1.1 黄土在我国的分布及物理特征	8
2.1.2 黄土的地层划分	9
2.2 黄土的微结构特征	11
2.2.1 黄土的微结构特征及骨架颗粒形态	11
2.2.2 黄土骨架颗粒的连接形式	11
2.2.3 黄土骨架颗粒的排列方式和孔隙	12
2.2.4 黄土的微结构分类	12
2.2.5 黄土的胶结物质和胶结类型	13
2.3 黄土的物理性质	14
2.4 黄土的力学性质	16
2.4.1 黄土的压缩变形特性	16
2.4.2 黄土的抗剪强度特性	20
2.4.3 黄土的抗拉特性	23
2.4.4 黄土的渗透特性	25
2.5 黄土的强度指标及其变化规律	27
2.5.1 黄土强度指标的变化规律	27
2.5.2 黄土抗剪强度指标的变化范围	30
2.5.3 黄土的残余强度	30

2.5.4	黄土强度指标的选用问题	31
2.6	离石黄土力学性质试验	33
2.6.1	依托工程地质条件分析	33
2.6.2	试样的选取与制作	34
2.6.3	离石黄土的物理性质试验	34
2.6.4	离石黄土的力学性质试验	35
2.6.5	离石黄土的应力-应变关系分析	37
2.6.6	离石黄土强度特性分析	42
2.7	黄土隧道围岩分级	43
2.8	本章小结	45
第3章	黄土连拱隧道信息化施工监控量测	46
3.1	概述	46
3.2	监控量测的意义和目的	46
3.2.1	监控量测的意义	46
3.2.2	监控量测的目的	47
3.3	监控量测的内容和方法	48
3.3.1	监控量测的内容	48
3.3.2	洞内、外观察	49
3.3.3	周边位移量测	50
3.3.4	拱顶下沉量测	51
3.3.5	浅埋地表下沉量测	51
3.3.6	喷射混凝土应力与二衬混凝土应力量测	52
3.3.7	围岩压力与两层支护间压力量测	53
3.3.8	钢拱架内力量测	55
3.3.9	锚杆轴力量测	55
3.3.10	围岩体内位移量测	56
3.3.11	仰拱应力量测	57
3.3.12	中隔墙应力量测	57
3.3.13	地表裂缝量测	58
3.4	监测断面布置	58
3.5	必测项目监测结果与分析	59
3.5.1	隧道周边位移量测结果分析	59
3.5.2	隧道拱顶下沉量测结果分析	60
3.5.3	地表下沉量测结果分析	63
3.6	选测项目监测结果与分析	65

3.6.1	围岩内部位移量测结果分析	65
3.6.2	锚杆轴力量测结果分析	65
3.6.3	围岩压力量测结果分析	71
3.6.4	钢架内力量测结果分析	72
3.6.5	两层支护间压力量测结果分析	73
3.6.6	喷射混凝土切向应变量测结果分析	74
3.6.7	二次衬砌钢筋应力量测结果分析	76
3.6.8	二次衬砌混凝土切向应变量测结果分析	76
3.6.9	仰拱应力量测结果分析	77
3.6.10	中隔墙应力量测结果分析	80
3.6.11	地表裂缝量测结果分析	81
3.7	黄土隧道围岩稳定性判别模型	82
3.8	本章小结	84
第4章	黄土连拱隧道围岩参数的位移反分析	85
4.1	概述	85
4.1.1	反分析方法的一般理论	85
4.1.2	人工神经网络基本理论	87
4.2	基于BP网络法的围岩参数动态增量反分析	92
4.2.1	BP网络模型的建立	92
4.2.2	学习样本的建立	93
4.2.3	网络结构优化	95
4.3	位移反分析结果与围岩参数的确定	96
4.4	本章小结	97
第5章	黄土连拱隧道相似模型试验研究	98
5.1	概述	98
5.2	依托工程简介	99
5.3	相似理论	101
5.3.1	相似原理	101
5.3.2	模型的破坏试验及地质力学模型的相似判据	103
5.3.3	试验相似关系的确定	103
5.4	黄土连拱隧道相似模型试验方案	104
5.4.1	模型试验方案	104
5.4.2	隧道相似模型试验系统	105
5.5	相似材料配比试验	107
5.5.1	相似材料试验	107

5.5.2 相似材料试验结果分析	112
5.6 离石黄土连拱隧道洞身Ⅳ级围岩段模型试验	113
5.6.1 相似模型制作	113
5.6.2 相似模型试验	114
5.6.3 模型试验结果分析	119
5.7 本章小结	120
第6章 黄土连拱隧道施工方案优化研究	121
6.1 概述	121
6.1.1 工程背景	121
6.1.2 隧道支护设计参数	121
6.1.3 支护结构的力学参数	122
6.2 Ⅳ级围岩浅埋偏压段施工方案对比	122
6.2.1 侧壁导坑法施工方案模拟	122
6.2.2 上下台阶法施工方案模拟	144
6.3 Ⅳ级围岩深埋段施工方案对比	156
6.3.1 侧壁导坑法施工方案模拟	156
6.3.2 上下台阶法施工方案模拟	171
6.4 Ⅴ级围岩浅埋偏压段施工方案优化	182
6.5 Ⅴ级围岩深埋段施工方案数值模拟	195
6.6 黄土连拱隧道施工方法的敏感性研究	205
6.6.1 施工方法选择敏感性的定义	205
6.6.2 埋深对施工方法选择的敏感性分析	206
6.6.3 不同跨度连拱隧道施工方法的敏感性分析	213
6.7 本章小结	221
第7章 黄土连拱隧道中隔墙形式及最小厚度分析	222
7.1 概述	222
7.1.1 平面有限元模型的建立	222
7.1.2 三导洞法的开挖过程	224
7.2 中隔墙形式及其受力研究	226
7.2.1 曲中隔墙模型Ⅰ开挖过程结构受力分析	226
7.2.2 曲中隔墙模型Ⅱ开挖过程结构受力分析	231
7.2.3 直中隔墙模型开挖过程数值模拟计算结果与分析	237
7.2.4 三种中隔墙模型计算结果对比分析	242
7.3 最小中隔墙厚度数值模拟	244
7.3.1 Ⅳ级围岩浅埋段最小中隔墙厚度	245

7.3.2	IV级围岩深埋段最小中隔墙厚度	251
7.3.3	V级围岩浅埋段最小中隔墙厚度	256
7.3.4	V级围岩深埋段最小中隔墙厚度	259
7.4	本章小结	262
第8章	黄土连拱隧道施工过程的空间效应分析	264
8.1	概述	264
8.1.1	模型计算范围	264
8.1.2	施工方案的简化	264
8.2	开挖面空间效应分析	265
8.2.1	左洞围岩变形分析	265
8.2.2	左洞围岩应力分析	266
8.2.3	控制截面计算结果分析	267
8.3	左右洞施工的相互影响分析	269
8.4	空间效应作用下中隔墙受力变形规律	271
8.4.1	中隔墙受力分析	271
8.4.2	中隔墙变形分析	274
8.5	本章小结	275
第9章	黄土连拱隧道动态施工损伤局部化研究	276
9.1	概述	276
9.2	原状黄土弹塑性损伤本构模型	277
9.2.1	应变空间的弹塑性损伤本构模型推导	278
9.2.2	应变空间的损伤演化规律推导	280
9.2.3	加载函数的确定	282
9.2.4	损伤门槛值及损伤屈服函数的确定	282
9.2.5	损伤本构模型参数的确定	285
9.2.6	损伤本构模型的验证	285
9.3	围岩损伤局部化程序二次开发研究	286
9.3.1	围岩损伤度概念的提出	286
9.3.2	FLAC ^{3D} 自定义本构模型的实现	288
9.3.3	自定义本构模型与FLAC ^{3D} 自带本构模型的对比研究	288
9.3.4	围岩损伤度计算模块的编制与验证	291
9.4	黄土连拱隧道动态施工损伤局部化数值模拟	293
9.4.1	黄土连拱隧道施工方案确定	293
9.4.2	黄土连拱隧道开挖数值分析	295
9.4.3	两种施工方案开挖围岩损伤局部化对比分析	309

9.5 本章小结	310
第10章 黄土连拱隧道设计与施工关键技术	311
10.1 概述	311
10.2 黄土连拱隧道衬砌结构设计	311
10.2.1 衬砌结构的选用	311
10.2.2 复合式衬砌	312
10.3 黄土连拱隧道中隔墙结构及其基础设计	314
10.3.1 连拱隧道中隔墙结构形式	314
10.3.2 黄土连拱隧道中隔墙结构设计	315
10.3.3 中隔墙基础设计	316
10.4 黄土连拱隧道防排水系统设计	316
10.4.1 洞口防排水	318
10.4.2 洞身防排水	318
10.4.3 隧道内外路基、路面排水	318
10.4.4 中隔墙防排水	319
10.5 黄土连拱隧道施工关键技术	321
10.5.1 黄土连拱隧道施工方法	321
10.5.2 洞口工程施工技术	331
10.5.3 洞身开挖施工技术	336
10.5.4 二次衬砌施工技术	347
10.5.5 结构物防排水施工技术	350
10.5.6 空洞检测与注浆回填技术	356
10.5.7 黄土连拱隧道常见病害处治技术	359
10.6 本章小结	363
参考文献	364

第 1 章 绪 论

1.1 连拱隧道的特征及适用范围

1.1.1 连拱隧道及其特征

连拱隧道(multi-arch tunnel),最初是指两座隧道连成一体的单线双洞隧道,也就是现在的双连拱隧道。单洞隧道是一洞一拱,双洞连体隧道必然双拱相连,故最初得名为连体隧道。考虑到连体隧道范围更为广泛,它不仅包括左右相连的连拱隧道,还包括上下双层的连体隧道,故连体隧道与连拱隧道不能等同视之。

后来研究认为,连拱隧道主要是拱部相连,从而称为连拱隧道,或严格称为双连拱隧道。也有人形象地用英文字母“m”表示既连体又连拱的隧道(称为“m”隧道)。还有人称其为联拱隧道。在日本,因连拱隧道形似眼睛,称为眼睛状隧道或眼睛法隧道。本书考虑到公路连拱隧道一般是指双洞连拱,故采用广为运用的“连拱隧道”这一名称。

连拱隧道在公路系统中主要修建在山岭深丘区埋深不大的丘陵部,在市区主要修建在受特殊地理条件限制或有特殊要求的区域。根据对国内外连拱隧道的资料进行统计可知,连拱隧道通常不长,多为中短规模,平均长度为 200m 左右,95%以上的连拱隧道不超过 500m。因多数连拱隧道长度较短,导致其具有埋深浅、围岩风化严重、较为破碎等一系列特征。此外连拱隧道因双洞相连,开挖跨度较大(两车道的跨度超过 20m,三车道的跨度大于 30m),易产生偏压,从而造成施工工序多,施工难度较大。

1.1.2 连拱隧道的优缺点

连拱隧道在公路隧道建设中得到广泛应用,其原因在于其具有独特的优点,主要表现如下:

(1) 在特殊的山岭深丘地区、在城市周边有山丘阻碍城乡交通处,以及在人多地少、经济活跃的山区兴建连拱隧道,有利于洞口和洞身的选择,减少隧道长度,减少投资。

(2) 避免隧道洞口桥隧或路隧分幅,节省了隧道进出口处洞口路基和桥梁分幅所占土地面积,也避免了线路从整体到分离再到整体的复杂转换,有利于路桥

隧道总体的线形流畅。

(3) 缩小了所占地下空间,提高了地下空间的利用效率。

(4) 在城乡交接的山丘处,因人流量和交通量大,适宜兴建双连拱或多连拱公路隧道,以满足城市发展的需要。

(5) 兴建连拱隧道,居民房屋拆迁和开挖土石方数量相对减少,有助于减少自然环境破坏和保护城郊名胜古迹,便于运营管理,有着明显的社会效益和经济效益。

公路连拱隧道除上述优点外,也有一些不足,主要表现在:

(1) 隧道开挖跨度大,两车道隧道跨度大于 20m,三车道隧道跨度大于 30m,因而经受围岩压力较大。

(2) 埋深浅,多次开挖爆破导致围岩多次扰动,尤其是中隔墙顶部及其两侧,稍有不慎就可能引起围岩塌方,甚至冒顶。

(3) 施工工序多,结构特殊且复杂,结构受力状态变化频繁,质量控制点多,施工技术难度较大并且维修不便。

(4) 中隔墙和边墙的施工及拱部二次衬砌施工相隔时间长,使得支护系统受力复杂。整体式中隔墙防水和主洞拱部防排水施工不同步进行,使得施工缝更加明显化。

(5) 整体式中隔墙渗漏水现象较为普遍,施工质量和洞口安全比不上分离式隧道。部分污水倒流入另一洞内。

1.1.3 连拱隧道的适用范围

根据连拱隧道的特点,选择连拱隧道结构形式时,需注意以下几点:

(1) 在洞口地形狭窄且围岩级别为 V 级以上(可含少量的 IV 级)的岩石地层可采用连拱隧道形式。

(2) 在特殊的地形下,若采用分离式隧道会导致左右洞长度相差很大,或使地面建筑受影响,或洞外路基工程量过大,经济上明显不合理时可采用连拱隧道。

(3) 在山岭深丘地形区内,当路基边坡等于或大于 40m,且左右路幅难以拉开成独立的左右线,或为避免大量的深挖高填的土石方工程量,减少对自然环境的破坏时,适宜成群成组建连拱隧道。

(4) 在城市周边的山丘地区,人口稠密,土地资源紧张,为减少地面房屋拆迁,保护自然景观和名胜古迹,满足日益增长的人流和交通量的需要,主要采用双连拱或多连拱隧道,如广州市白山和武汉市马鞍山的三车道连拱隧道、福州市二环路象山四连拱隧道。

(5) 由于连拱隧道造价较高且存在一些其他不足,目前国内主要采用中短规模隧道。但在日本也建有中长规模的连拱隧道,有的连拱隧道长达 1240m。

1.2 黄土公路连拱隧道修建技术研究现状

1.2.1 黄土隧道研究现状

尽管黄土地下建筑在我国已有几千年的历史,但是对其设计计算理论进行系统研究,还是从20世纪60年代初开始的。由于以往在进行地下洞室设计计算时所采用的唯一模型是“荷载-结构”模型,即把作用在衬砌上的围岩压力作为外加荷载,只要荷载确定了,就可以像地面建筑那样,利用结构力学理论,进行衬砌的设计计算。所以在地下洞室的设计计算中,围岩压力的确定就成为问题的关键,黄土地下洞室也不例外。黄土洞室设计计算理论的研究,主要有四个阶段:①20世纪五六十年代的设计是以普氏理论为基础的,通过大量工程实践,发现普氏理论对我国黄土洞室不适用,随后开始对黄土洞室围岩压力问题的系统研究;②根据实践经验,在60年代初提出以工程地质类比法指导设计,并对黄土按地下洞室稳定性要求作了相应的分类;③70年代提出了以工程地质类比为主,力学计算为辅的方法指导设计;④90年代至今,随着计算技术的发展,对土体应力-应变关系的研究逐渐深入,出现了各种各样的弹塑性应力-应变模型。在此基础上提出了许多弹塑性数值方法。

从20世纪60年代对黄土地下洞室的围岩压力开展系统的研究以来,陕西省建筑设计研究院、中国建筑西北设计研究院等单位在甘肃、山西、陕西等地区近十个工程点进行了综合性的现场量测,并对这些地区的黄土洞室做了广泛调查。通过大量生产实践、现场量测及调查研究,在量和质方面对黄土洞室的围岩压力有了较深入的认识:

(1) 塌方一般首先发生在拱肩或两侧,然后随着洞形及应力条件恶化向洞顶发展。塌方的主要特征是脆性剪切破坏。

(2) 现有的黄土洞室埋深大多为20~50m,这些洞室的衬砌大部分是“薄”衬砌(相对于普氏理论计算出的衬砌厚度)。这些衬砌有些虽然在拱腰内缘出现拉裂缝,但却能保持相对稳定。

(3) 洞室土体变形不是局限于洞周附近一个小范围内,而是在由洞壁直至地表的一个很大范围内连续变化,逐渐减小,衬砌后在洞周一定范围内没有发现土体变形有突然的、明显的变化。

(4) 与土体变形相似,作用在衬砌上的围岩压力也没有突然性,它是随着掘进与时间的增长而增长。

但是,随着隧道埋深和跨度的加大,以及连拱隧道这种结构形式的出现,目前的研究是不够的,对这些情况下的隧道动态施工力学和支护结构应力变化的研究

还有待深入。

1.2.2 黄土连拱隧道研究现状

1. 连拱隧道相似模型试验研究现状

相似模拟方法最早由库兹涅佐夫于 1936 年提出。Stillborg 和 Stephansson 于 1978 年在大跨度洞室的“Rib-in-Roc”预加固(钢筋加固)系统的模型研究中,采用了以砂-石蜡模拟岩石材料,岩块作为开挖体,再由管道注入水使之溶解来模拟开挖过程的方法。

1981 年 Kaiser 和 Morgenstern 在设计一个过程模拟试验(process simulation test)时,选用加拿大 Edonton 附近的 Wabamum 次烟煤来模拟节理岩体中圆形隧道的依时性(time-dependent)强度和变形特征,并详细阐述了试验测试系统、数据处理系统等,还讨论了破坏扩展和相关应力重分布的时间相关和时间无关时的隧道收敛及岩体径向应变形式,建立了场应力、应变或隧道闭合量与时间的关系,评估了破坏前的应力范围及形成屈服区后的隧道性能。

20 世纪 70 年代初,同济大学通过三维物理模型研究了拱形直墙喷层结构所受的压应力特性及其剪切破坏机理,发现喷层荷载主要来自于与围岩共同变形中的形变压力,而非塌落荷载。1984 年,同济大学又利用平面应力模型研究了大跨度矮墙洞室开挖中开挖方法对洞室稳定性的影响,并确认了围岩中存在三个不同的应力区:疏松区、压缩区和自然区。

1993 年,王兵和陈炽昭在自制的隧道三维模型试验装置(最大尺寸 $2\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$,开挖跨度为 0.2486m)上,基于围岩应变软化的弹塑性本构关系,在考虑初始自重应力场的前提下,采用“先挖洞,后加载”的分级加载模拟试验方法,发现了模型侧压满足 $\sigma_h = \mu/(1-\mu)\sigma$,以及毛洞拱顶下沉和最大跨度处水平位移与平面应变有限元和三维有限元计算值较一致,并考察了工作面支护效应的有效范围为 $0 \sim 2D$ (D 为隧道的最大跨度),但最有效范围为 $0 \sim 0.7D$,两帮剪切滑移的深度此时达到恒定,且破坏形式和有限元计算结果一致。不足之处是该试验装置无法模拟支护效应和动态开挖过程。

2002 年,林刚对 V、IV、Ⅲ级围岩采用不同的施工方法进行了相似模拟试验研究。试验分别对围岩、模筑混凝土和喷射混凝土、锚杆和混凝土中的主筋,以及工字钢拱架采用相似材料进行替代。最后测出了地表相对位移、洞室周边径向位移、围岩与支护间接触压力和锚杆轴力,取得了较好的试验效果。

2006 年,刘涛等以云南省元磨高速公路的一座连拱隧道为工程背景,按弹性阶段相似原则进行连拱隧道室内模型试验,模拟连拱隧道的施工工况,采用压力盒、数码摄像、沉降板等仪器测量施工过程中的隧道围岩应力和位移分布,采用三

维快速拉格朗日元法模拟连拱隧道的施工工况,得出施工过程中隧道围岩位移、应力和塑性区分布规律,其结果与模型试验所得结果基本一致。

2007年,万明富对沈大高速公路改扩建工程韩家岭单洞四车道超大跨公路隧道通过室内相似模型试验对台阶法开挖方案进行研究,得到开挖过程中围岩的力学行为及其变化规律,发现最大位移发生在拱顶。

以上学者主要是对岩质分离式隧道和连拱隧道进行了相似模型试验研究,对土质隧道,尤其是黄土连拱隧道开挖方案、施工工艺等的模型试验研究甚少。

2. 黄土连拱隧道施工技术研究现状

黄土是一种具有独特工程性质的特殊性土。黄土的特殊性除了表现在其地质特征、微观结构特征以及其他物理性质以外,从岩土工程意义来说,黄土最主要的特殊性是其力学性质,特别是强度和湿陷特性。因此,黄土隧道的开挖与岩质隧道相比,有其自身的特点。国内外学者对黄土连拱隧道的开挖研究如下:

刘新荣、孙辉等通过对离石连拱隧道的二维弹塑性数值模拟,分析了隧道在开挖各阶段的应力和变形情况,针对隧道中隔墙受力情况进行了专题研讨,进而对连拱隧道的结构设计和施工作了一些探讨。

孙辉、刘新荣等针对汾柳高速公路离石隧道在不同施工方法下围岩和隧道支护结构的受力问题,运用有限元程序 ANSYS 对三导洞法和上下台阶法进行了动态数值模拟,建立了不同施工工序下围岩的位移场和应力场,并以此对这两种施工方法进行了对比分析,得出三导洞法较优。

刘新荣、孙辉等通过数值计算和现场监测分析表明,黄土连拱隧道二次衬砌所受荷载很大,在初期支护和二次衬砌间存在不均匀压力,二次衬砌也是隧道的主要承载结构。二次衬砌所受荷载大小与其施筑时间有很大的关系,在设计和施工中要合理掌握二次衬砌所承担的荷载比例和施筑时间。

刘元雪、蒋树屏等结合山西省离石隧道对黄土连拱隧道的关键施工力学问题进行了研究: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。

刘元雪、蒋树屏等通过黄土连拱隧道的三维弹塑性数值模拟,分析了在左洞施工后,右洞施工对左洞的影响规律。对于山西省离石隧道,两洞开挖面的合理距离为 30m。推广而言,对于黄土连拱隧道,两洞的开挖距离应为单洞跨度的 3 倍。

姚惠发、刘新荣、钟祖良以山西省离石隧道为工程依托,详细介绍了影响黄土隧道施工安全的因素,分析研究了该工程中的施工方法:主洞施工采取先左洞、后右洞的施工顺序,主洞开挖分上下台阶,上台阶施工完成以后,立即进行支护,封

闭拱顶,下台阶采用机械开挖,同时对监控量测要点进行了重点阐述。

3. 黄土连拱隧道中隔墙监测技术研究现状

新奥法应用岩体力学原理,以维护和利用围岩的自稳能力为基点,将锚杆和喷射混凝土集合在一起作为主要支护手段,通过对围岩与支护的现场量测,及时反馈围岩-支护复合体的力学动态及其变化状况,为二次衬砌提供合理的浇注时机,通过监控量测及时反馈的信息来指导隧道工程的设计和施工。

作为一种新兴的隧道形式,连拱隧道在监控量测上对新奥法的监测技术提出了新的要求,尤其是中隔墙的量测。由于中隔墙在隧道的修筑过程中受力状况非常复杂,压、弯、剪、扭均有,施工过程中在中隔墙埋设应变计、钢筋计、压力盒等监测设备。通过长期量测并分析量测数据来掌握中隔墙结构在整个施工过程中的应力与应变状况相当困难:一方面是监测力度不够,出于工程造价和工期因素,我国连拱隧道的监控量测工作一般仅选择洞内观测、洞周收敛、拱顶沉降和地表沉降4项必测项目,以及锚杆轴力等少数几项选测项目,而中隔墙的量测则仅就墙顶与墙脚等部位的压力进行量测;另一方面,现有的量测设备不能全面反映墙体结构的受力状况,中隔墙就其截面而言是个宽2~3m,高4~5m的大型钢筋混凝土结构,采用应变计、钢筋计、压力盒等量测设备仅能在一定程度上反映结构的受力状况。今后还有待研发出针对中隔墙的量测仪器来帮助我们进一步认识这一特殊结构的实际工作状态。

鉴于以上原因,我国在中隔墙的监测方面还处于探索阶段,所取得的监控量测成果也相当有限,在黄土地区修建连拱隧道时,对中隔墙的监控量测项目和方法有待深入探讨。

1.3 黄土公路连拱隧道修建技术展望

从2004年我国第一条黄土公路连拱隧道——山西省离石黄土连拱隧道修建以来,对黄土公路连拱隧道的设计施工和研究已近10年,国内外已获得一些相关的成果,但是其设计、施工还存在许多问题有待进一步的研究。

1) 隧道设计荷载的计算

连拱隧道结构复杂,开挖步序多,隧道开挖、支护相互交错,这造成黄土连拱隧道围岩应力变化和衬砌结构荷载转换复杂,很难获得黄土连拱隧道围岩应力分布和衬砌结构荷载变化规律。因此,进行黄土连拱隧道设计荷载计算时有很大困难。到目前为止,国内外还未有相关研究报道,但由于隧道支护体系的主要设计依据为隧道施工全过程以及施工结束后作用在结构上的荷载,因此研究黄土连拱隧道施工全过程以及施工结束后作用在隧道衬砌结构上的荷载尤其重要。