



HUANGTU SUIDAO GONGCHENG

黄土隧道工程

◎ 赵勇 李国良 喻渝 著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

黄土隧道工程

赵勇 李国良 喻渝 著

湖北工业大学图书馆



01295014



中国铁道出版社

2011年·北京

C
U459.9
3

内 容 简 介

本书是近年来众多从事黄土隧道设计、施工、建设管理和研究人员集体智慧的结晶,特别是归纳了郑西高速铁路黄土隧道的建设经验和研究成果。

本书分析了黄土隧道的建设历史与现状,总结出黄土隧道建设技术问题和主要成果;阐述黄土隧道围岩的工程特性,提出黄土隧道围岩分级方法;揭示了黄土隧道施工地表变形与裂缝规律,确定了黄土隧道深浅埋分界及黄土围岩设计荷载的计算方法;详细论述黄土隧道各种支护措施的作用机理和效果分析,并提出黄土隧道合理支护参数;分析了不同黄土隧道施工工法的力学特性和适用性,指出适用工法的关键技术;结合工程实例介绍湿陷性黄土隧道基底处理和黄土隧道下穿构筑物施工技术;对黄土隧道洞口边仰坡稳定性进行了分析,给出黄土洞口边仰坡工程措施。

本书强调理论和工程实践的结合,对关键技术从理论分析、数值计算、模型试验、现场测试等多方面进行分析,明确提出设计参数和施工工艺,方便从事黄土隧道的科学研究、工程设计、施工和建设管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土隧道工程/赵勇,李国良,喻渝著. —北京:中国铁道出版社,2011.12
ISBN 978-7-113-13837-0

I. ①黄… II. ①赵… ②李… ③喻… III. ①土质隧道—隧道工程 IV. ①U459.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 229061 号

书 名: 黄土隧道工程

作 者: 赵 勇 李国良 喻 渝 著

策划编辑: 傅希刚

责任编辑: 张 婕

编辑部电话: 路 (021)73141

电子信箱: crph_zj@163.com

封面设计: 冯龙彬

责任校对: 孙 玫

责任印制: 郭向伟

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

版 次: 2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷

开 本: 889mm×1194mm 1/16 印张: 20.75 字数: 543千

书 号: ISBN 978-7-113-13837-0

定 价: 120.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部联系调换。

联系电话: 市电 (010)51873170, 路电 (021)73170 (发行部)

打击盗版举报电话: 市电 (010)63549504, 路电 (021)73187

前 言

黄土是我国极具特色的一种特殊土,具有明显的垂直节理的结构特性。因形成时代、成因、含水量及区域不同,其物理力学和工程性质差异较大。在黄土地区修建隧道时,应全面、深入地掌握区域内黄土的特性,充分借鉴已取得的建设经验,结合具体工程的特点积极开展科学研究,达到安全、优质建设黄土隧道的目的。

100多年来,我国在黄土地区修建了大量铁路、公路等隧道工程,随着工程经验的积累,对黄土隧道的工程特性也有了逐步深入的认识。黄土垂直节理发育,因节理切割形成竖向软弱面,在隧道开挖形成临空面后,易沿软弱面剥落,诱发塌方。浅埋隧道开挖时,地表沉降量大,容易产生地表裂缝,对地表环境和建(构)筑物影响大。新黄土多具湿陷性,隧道基底承载力低,影响黄土隧道结构的稳定。黄土隧道初期支护变形大,且难以控制,变形以竖向沉降为主,容易发生洞室坍塌,影响施工安全。黄土隧道边仰坡坡面受大气降雨的影响下,易局部失稳发生溜坍,影响运营安全。针对黄土隧道特殊的工程特性,铁道部结合郑西高速铁路特大断面黄土隧道的建设,组织对黄土隧道围岩工程特性、黄土围岩分级、设计和施工等一系列关键技术开展科学研究,取得了铁路大断面黄土隧道合理支护参数及地表沉降控制技术、大断面黄土隧道施工方法与监控技术、黄土隧道地表裂缝控制技术等一批研究成果。上述成果成功地指导了郑西等高速铁路黄土隧道的建设,丰富和发展了我国黄土隧道建设技术,推动了我国乃至世界隧道建设技术的进步。

本书在充分总结以上研究成果和实践经验的基础上,结合其他已有的相关黄土隧道工程建设情况,系统介绍了黄土隧道围岩的工程特性,提出黄土隧道围岩分级方法;揭示了黄土隧道施工地表变形与裂缝规律,确定了黄土隧道深浅埋分界及黄土围岩设计荷载的计算方法;详细论述了黄土隧道各种支护措施的作用机理和效果,并提出黄土隧道合理支护参数;分析了不同黄土隧道施工工法的力学特性和适用性,指出了适用工法的关键技术;同时,还结合工程实例总结了湿陷性黄土隧道基底处理和黄土隧道下穿构筑物施工技术;对黄土隧道洞口边仰坡稳定性进行了分析,给出了黄土隧道洞口边仰坡防护的工程措施。

本书的编写人员具有丰富的黄土隧道设计、施工和科研经验,编委会成员均参加了郑西高速铁路大断面黄土隧道的建设。本书结合铁道部近几年的研究成果,由赵勇、李国良、喻渝撰写成文,编审委员会组织审查修改。课题组主要人员参加了撰写和审查,分工如下:朱永全(第1章、第4章、第11章)、李德武(第2章、第3章),叶朝良(第4章),王明年(第3章、第5章、第6章),谭忠盛(第6章),宋冶(第7章、第9章),马建林(第8章第8.3节),熊治文(第8章第8.1、8.2节,第10章),刘建友(目录翻译),最终由关宝树、蔡申夫、朱永全、钱征宇主审。在本书编审过程中,王晓州、杨健民、赵东平、王新东、马侃彦、倪光斌、霍玉华、杨林浩、赵永明、唐国荣、田四明、肖广智等为本书提供

了很多宝贵资料,并参加审查会审查。王梦恕和梁文灏两位院士以及史玉新设计大师作为本书顾问,提出很多宝贵意见,王院士亲自为本书写序。铁道部工程设计鉴定中心任润堂副主任、铁一院刘培硕副院长、铁二院许佑顶总工程师对本书的编著给予大力支持并亲自指导。铁道部总规划师、工程设计鉴定中心主任郑健组织了黄土隧道设计参数的优化研究,对本书的出版提出详细的指导意见,并组织编审委员会审查了本书。中国工程院院士、铁道部何华武总工程师对黄土隧道的修建非常重视,在郑西高速铁路建设过程中,多次到现场指导,并组织专家对遇到的难题进行研讨,为本书的出版也特别写序。在此,特向以上各位专家、各位领导对本书的指导与帮助表示衷心感谢。

本书是铁道部近几年黄土隧道建设的成果集成,特别是引用了大量郑西高速铁路大断面黄土隧道的试验参数、研究结论和工程实践案例,在此向参加郑西、石太等黄土隧道建设的设计、施工、建设管理和科研人员表示感谢。本书获铁路科技图书出版基金资助出版。

由于时间仓促,水平有限,书中疏漏和不妥之处,恳请有关专家和读者给予批评指正。

作 者

2011 年 10 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 我国黄土的分布及特征	1
1.1.1 黄土的定义	1
1.1.2 黄土的分布	1
1.1.3 黄土的特征	2
1.2 黄土隧道建设历史与现状	3
1.2.1 铁路黄土隧道建设历史	3
1.2.2 公路黄土隧道建设历史	5
1.2.3 黄土隧道建设现状	8
1.3 黄土隧道断面等级和跨度的划分	11
1.3.1 黄土隧道断面等级划分	11
1.3.2 黄土隧道跨度分级	13
1.4 黄土隧道建设技术问题	14
1.5 郑西高速铁路大断面黄土隧道建设的主要成果	16
参考文献	19
第2章 黄土隧道围岩工程特性	21
2.1 物理力学特性	21
2.1.1 物理力学参数指标	21
2.1.2 弹性参数统计	26
2.2 强度特性	27
2.2.1 抗剪强度	28
2.2.2 无侧限抗压强度	31
2.2.3 抗拉强度	32
2.3 变形特性	34
2.3.1 固结试验、压缩系数和压缩模量	34
2.3.2 黄土的三轴压缩和单轴压缩变形性质	36
2.3.3 现场载荷试验及变形参数	37
2.4 构造特征	40
2.4.1 黄土垂直节理发育特征	40
2.4.2 黄土结构和构造特征对强度的影响	41
2.4.3 黄土力学性质的各向异性	43
2.4.4 黄土构造特征对隧道稳定性的影响	48
参考文献	49

第3章 黄土隧道围岩分级	50
3.1 影响黄土隧道稳定的因素	50
3.2 分级指标体系	50
3.2.1 形成年代对黄土分级的影响	52
3.2.2 含水率对力学性质的影响	52
3.2.3 埋深对物性参数的影响	54
3.2.4 物理力学指标的变异性	56
3.3 围岩分级	56
3.3.1 分级思路及分级指标的确定	56
3.3.2 围岩分级	58
参考文献	59
第4章 黄土隧道施工地表变形与裂缝规律	60
4.1 黄土隧道施工变形特征	60
4.1.1 变形与埋深的关系	60
4.1.2 变形与工序的关系	62
4.1.3 地表沉降变形与雨水的关系	62
4.1.4 变形特征	63
4.2 施工地表裂缝形成机理	64
4.2.1 围岩构造特征	64
4.2.2 各向异性力学性质	64
4.2.3 施工地表裂缝形成机理	65
4.3 施工地表裂缝形成规律研究	65
4.3.1 地表裂缝调查	65
4.3.2 裂缝规律物理探测	71
4.3.3 裂缝规律坑探测试	72
4.3.4 裂缝规律有限元分析	74
4.3.5 裂缝发展规律离散元分析	78
4.3.6 裂缝形成规律	81
4.4 黄土隧道施工地层裂缝规律室内模型试验	82
4.4.1 模型试验相似比的确定	82
4.4.2 模型试验装置	83
4.4.3 模型试验相似材料选择	84
4.4.4 室内模型试验工况	85
4.4.5 室内模型试验成果	85
4.5 地表裂缝对隧道长期稳定性影响	90
4.5.1 分析模型	90
4.5.2 计算结果	91
4.5.3 浸水影响分析	92
4.6 地表裂缝施工预防控制与处理技术	92
4.6.1 防止地表裂缝形成的施工控制标准	92
4.6.2 减少地表裂缝危害性的洞外施工措施	92

4.6.3 防止地表裂缝形成的洞内施工措施	93
4.6.4 地表裂缝的处理措施	93
参考文献	93
第5章 黄土隧道深浅埋分界及设计荷载	96
5.1 黄土隧道围岩破坏模式	96
5.1.1 黄土隧道围岩破坏模式调查	96
5.1.2 黄土隧道围岩破裂角现场调查	97
5.2 黄土隧道深浅埋界定依据	98
5.2.1 理论假定	98
5.2.2 深浅埋界定判据	99
5.2.3 深浅埋分界深度	99
5.3 黄土隧道的设计荷载	100
5.3.1 黄土隧道围岩压力计算理论	100
5.3.2 黄土隧道围岩压力实测数据分析	102
5.3.3 理论计算与实测压力对比分析	112
5.3.4 围岩压力分布形式	118
参考文献	123
第6章 黄土隧道支护设计	124
6.1 黄土隧道支护设计原则	124
6.2 黄土隧道系统锚杆的作用机理分析	124
6.2.1 浅埋隧道系统锚杆现场试验	124
6.2.2 深埋隧道系统锚杆现场试验	134
6.2.3 黄土隧道锚杆作用机理分析	141
6.3 黄土隧道钢架作用机理分析及效果评价	145
6.3.1 喷射混凝土早期强度与弹模试验	145
6.3.2 三维数值模拟及分析	147
6.3.3 钢架作用机理及评价	150
6.4 黄土隧道超前支护作用效果分析	154
6.4.1 小导管作用效果分析	154
6.4.2 大管棚作用效果分析	157
6.5 黄土隧道预留变形量分析	165
6.5.1 IV级围岩隧道初期支护变形统计	165
6.5.2 V级围岩隧道初期支护变形统计	166
6.5.3 IV级围岩隧道预留变形量确定	167
6.5.4 V级围岩隧道预留变形量确定	168
6.6 黄土隧道二次衬砌受力特征及设计思路	168
6.6.1 二次衬砌荷载分配比例	168
6.6.2 弹性抗力系数现场试验确定	169
6.6.3 黄土隧道二次衬砌设计思路	171
6.7 黄土隧道合理支护参数	173
参考文献	174



第7章 黄土隧道施工方法及关键技术	176
7.1 黄土隧道施工方法概述	176
7.2 不同工法施工过程的力学特性	179
7.2.1 双侧壁导坑法力学特性	179
7.2.2 交叉中隔壁法力学特性	183
7.2.3 中隔壁法力学特性	187
7.2.4 预留核心土台阶法力学特性	191
7.2.5 各种工法力学特性综合评价	206
7.3 工法适用性分析	212
7.3.1 双侧壁导坑法分析	212
7.3.2 交叉中隔壁法分析	212
7.3.3 中隔壁法分析	213
7.3.4 预留核心土台阶法分析	213
7.3.5 各种工法适用性综合评价	213
7.4 适用工法的关键技术及解决途径	214
7.4.1 大断面黄土隧道稳定性的技术关键	214
7.4.2 解决技术关键的原则与方法	214
7.4.3 适用工法的关键技术	215
7.4.4 浅埋大断面黄土隧道预留核心土台阶法适用技术参数	220
7.5 三台阶七步开挖法施工技术	221
7.5.1 工法简介	221
7.5.2 施工工艺	221
7.5.3 工程应用	224
7.6 变形控制基准与监测方法	230
7.6.1 大断面黄土隧道变形控制基准	230
7.6.2 监测方法	234
参考文献	237
第8章 湿陷性黄土隧道基底处理技术	239
8.1 基底稳定性评价	239
8.1.1 黄土的湿陷性	239
8.1.2 黄土湿陷性评价	240
8.1.3 黄土隧道的基底稳定性评价	241
8.2 基底处理方法	242
8.2.1 基底处理原则	242
8.2.2 基底处理方法	242
8.2.3 挤密桩处理技术	243
8.2.4 树根桩处理技术	246
8.3 黄土隧道基底稳定性分析	249
8.3.1 基础稳定性含义及判别依据	249
8.3.2 现场激振试验	251
8.3.3 试验结果分析	254

8.3.4 隧道基底沉降长期稳定性评价	255
参考文献	258
第9章 黄土隧道下穿构筑物施工技术	259
9.1 施工基本原则	259
9.2 地表沉降控制基准	261
9.2.1 下穿高速公路的沉降控制基准	261
9.2.2 下穿运营铁路的沉降控制基准	261
9.3 下穿高速公路施工技术	262
9.3.1 工程概况	262
9.3.2 技术试验	263
9.3.3 技术优化	268
9.3.4 下穿段应用	273
9.3.5 道路沉降应急预案	275
9.4 下穿运营铁路施工技术	276
9.4.1 工程概况	276
9.4.2 双层支护台阶法的设计与施工	277
9.4.3 双层支护台阶法的力学特性	280
9.4.4 双层支护台阶法适用性及关键技术	285
9.4.5 轨道加固预案	287
参考文献	288
第10章 黄土隧道洞口边仰坡稳定性分析及防护技术	289
10.1 洞口边仰坡防护的必要性	289
10.1.1 洞口边仰坡防护现状	289
10.1.2 黄土隧道边仰坡防护的重要性	289
10.2 黄土隧道洞口边仰坡稳定性分析	290
10.2.1 黄土边仰坡稳定性的影响因素	290
10.2.2 黄土边仰坡的破坏模式	291
10.2.3 黄土洞口边仰坡稳定性分析	293
10.3 高速铁路黄土隧道洞口边仰坡防护技术	297
10.3.1 郑西高速铁路黄土隧道洞口边仰坡防护	297
10.3.2 高速铁路黄土隧道洞口边仰坡防护技术要点	304
参考文献	306
第11章 黄土隧道建设技术发展方向	307



Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Distribution of loess in China and its characteristics	1
1.1.1 Definition of loess	1
1.1.2 Distribution of loess	1
1.1.3 Characteristics of loess	2
1.2 Historical and present status of loess tunnel construction	3
1.2.1 History of railway loess tunnel construction	3
1.2.2 History of highway loess tunnel construction	5
1.2.3 Present status of loess tunnel construction	8
1.3 Classification of cross-section and span for loess tunnels	11
1.3.1 Cross-section classification for loess tunnels	11
1.3.2 Span classification for loess tunnels	13
1.4 Technical problems in loess tunnel construction	14
1.5 Main research results during the construction of large cross-section loess tunnels on Zhengzhou-Xi'an high-speed railway	16
References	19
Chapter 2 Engineering characteristics of loess surrounding tunnels	21
2.1 Physical and mechanical behaviour of loess surrounding tunnels	21
2.1.1 Physical and mechanical parameters of loess surrounding tunnels	21
2.1.2 Statistics of elastic parameters of loess surrounding tunnels	26
2.2 Strength characteristics of loess surrounding tunnels	27
2.2.1 Shearing strength	28
2.2.2 Unconfined compressive strength	31
2.2.3 Tensile strength	32
2.3 Deformation characteristics of loess surrounding tunnels	34
2.3.1 Consolidation test, coefficient of compressibility and compressive modulus	34
2.3.2 Triaxial and uniaxial compression deformation characteristics of loess	36
2.3.3 Field loading test and deformation parameters	37
2.4 Tectonic characteristics of loess surrounding tunnels	40
2.4.1 Developing characteristics of vertical joints in loess	40
2.4.2 Structural and tectonic influences on strength of loess	41
2.4.3 Anisotropy of mechanical property of loess	43
2.4.4 Influence of tectonic characteristics of loess on tunnel stability	48
References	49



Chapter 3	Classification of loess surrounding tunnels	50
3.1	Factors influencing loess tunnel stability	50
3.2	Indices for classification	50
3.2.1	Influence of age of loess on classification	52
3.2.2	Influence of water content on mechanical properties of loess	52
3.2.3	Influence of buried depth on physical parameters of loess	54
3.2.4	Variability of physical and mechanical indices of loess	56
3.3	Classification of loess surrounding tunnels	56
3.3.1	Approach and indices of classification	56
3.3.2	Classification of surrounding loess	58
References		59

Chapter 4	Characteristics of ground deformation and fissures produced by construction of loess tunnels	60
4.1	Characteristics of deformation produced by construction of loess tunnels	60
4.1.1	Relationship between deformation and buried depth	60
4.1.2	Relationship between deformation and construction sequence	62
4.1.3	Relationship between ground surface sedimentation settlement and raining	62
4.1.4	Characteristics of deformation	63
4.2	Formation mechanism of ground fissures produced by tunnel construction	64
4.2.1	Tectonic characteristics of surrounding loess	64
4.2.2	Anisotropy of mechanical properties	64
4.2.3	Formation mechanism of ground fissures	65
4.3	Characteristics of ground fissures produced by tunnel construction	65
4.3.1	Survey of ground fissures	65
4.3.2	Geophysical prospecting test of ground fissures	71
4.3.3	Pit test of ground fissures	72
4.3.4	Finite element analysis of ground fissures	74
4.3.5	Discrete-element analysis of development of ground fissures	78
4.3.6	Formation of ground fissures	81
4.4	Model test of ground fissures produced by construction	82
4.4.1	Confirmation of similarity ratio for model test	82
4.4.2	Rig for model test	83
4.4.3	Selection of equivalent material for model test	84
4.4.4	Operating conditions of model test	85
4.4.5	Results of model test	85
4.5	Influence of ground fissures on long-term stability of tunnels	90
4.5.1	Analytical model	90
4.5.2	Results	91
4.5.3	Immersion impact analysis	92
4.6	Control of and processing technique for ground fissures	92

4.6.1	Construction control standard for preventing ground fissures	92
4.6.2	Construction measures outside tunnels for controlling ground fissures	92
4.6.3	Construction measures inside tunnels for controlling ground fissures	93
4.6.4	Measures for controlling ground fissures	93
References		93
Chapter 5	Definition of deep and shallow buried tunnels and load of surrounding loess	96
5.1	Failure mode of loess surrounding tunnels	96
5.1.1	Survey of failure mode	96
5.1.2	Field investigation of rupture angle of surrounding loess	97
5.2	Definition of deep and shallow buried tunnels	98
5.2.1	Theoretical assumption	98
5.2.2	Criteria for definition of deep and shallow buried tunnels	99
5.2.3	Depth of deep and shallow buried tunnels	99
5.3	Design load of loess tunnels	100
5.3.1	Computation of pressure of loess on tunnels	100
5.3.2	Data analysis of pressure of loess	102
5.3.3	Comparative analysis of calculated and observed pressure	112
5.3.4	Distribution mode of surrounding pressure	118
References		123
Chapter 6	Support design of loess tunnels	124
6.1	Principles of design for loess tunnels	124
6.2	Behavior of of systematic rock bolts for loess tunnels	124
6.2.1	Field test of systematic rock bolts for shallow buried tunnels	124
6.2.2	Field test of systematic rock bolts for deep buried tunnels	134
6.2.3	Behavior of rock bolts	141
6.3	Analysis and evaluation of behaviors of slattice girders	145
6.3.1	Early strength and elastic modulus test of sprayed concrete	145
6.3.2	Three-dimensional numerical simulation and analysis	147
6.3.3	Behavior and evaluation of steel frames	150
6.4	Analysis of effects of advance support on loess tunnels	154
6.4.1	Analysis of effect of forepoling	154
6.4.2	Analysis of effect of large pipesroof	157
6.5	Analysis of deformation allowance for loess tunnels	165
6.5.1	Deformation statistics of preliminary support for IV-level surrounding loess	165
6.5.2	Deformation statistics of preliminary support for V-level surrounding loess	166
6.5.3	Confirmation of deformation allowance for IV-level surrounding loess	167
6.5.4	Confirmation of deformation allowance for V-level surrounding loess	168
6.6	Stressing characteristics of secondary lining and its use in loess tunnel design	168
6.6.1	Load distribution ratio of secondary lining	168

6.6.2	Field test for confirmation of elastic resistance coefficient	169
6.6.3	Design approach of secondary lining for loess tunnels	171
6.7	Reasonable support parameters of loess tunnels	173
	References	174

Chapter 7 Construction methods and key technologies for loess tunnels 176

7.1	Overview of construction methods for loess tunnels	176
7.2	Mechanical behaviours of different construction methods	179
7.2.1	Mechanical behaviours of both side drift method	179
7.2.2	Mechanical behaviours of center cross diaphragm method (CRD)	183
7.2.3	Mechanical behaviours of center diaphragm method (CD)	187
7.2.4	Mechanical behaviours of benching method with the core	191
7.2.5	Overall evaluation of mechanical behaviours of different construction methods	206
7.3	Analysis of applicability of different construction methods	212
7.3.1	Both side drift method	212
7.3.2	Center cross diaphragm method (CRD)	212
7.3.3	Center diaphragm method (CD)	213
7.3.4	Benching method with core soil	213
7.3.5	Overall evaluation of applicability of different construction methods	213
7.4	Key technologies and their use in different construction methods	214
7.4.1	Key technologies used in the stabilization of large cross-section loess tunnels	214
7.4.2	Principles and methods for solving key problems with these technologies	214
7.4.3	Key technologies suitable for construction methods	215
7.4.4	Suitable parameters of the benching method with core soil for shallow buried large cross-section loess tunnels	220
7.5	Construction technique for the three-bench seven-step excavation method	221
7.5.1	Introduction to the construction method	221
7.5.2	Construction process	221
7.5.3	Applications	224
7.6	Deformation control standard and monitoring technology for loess tunnels	230
7.6.1	Deformation controlling standard for cross-section loess tunnels	230
7.6.2	Deformation monitoring technology	234
	References	237

Chapter 8 Foundation base considerations for collapsible loess tunnels 239

8.1	Stability of foundation bases of collapsible loess tunnels	239
8.1.1	Collapsibility of loess	239
8.1.2	Evaluation of collapsibility of loess	240
8.1.3	Stability of foundation bases of loess tunnels	241
8.2	Treatment methods for foundation base	242
8.2.1	Treatment principle for foundation base	242
8.2.2	Methods for foundation base	242

8.2.3	Use of compaction piles	243
8.2.4	Processing technology of root piles	246
8.3	Stability analysis for foundation base of loess tunnels	249
8.3.1	Implication and evaluation criteria of foundation stability	249
8.3.2	Field vibration test	251
8.3.3	Analysis of test results	254
8.3.4	Long-term stability of tunnel foundation bases	255
References		258
Chapter 9 Construction techniques for loess tunnels under existing structures		259
9.1	Basic construction principles	259
9.2	Controlling standard of ground settlement	261
9.2.1	Controlling standard of ground settlement for tunnelling under an express highway	261
9.2.2	Controlling standard of ground settlement for tunnelling under an operating railway	261
9.3	Construction technique for tunnelling under an express highway	262
9.3.1	Project overview	262
9.3.2	Technical test	263
9.3.3	Technology optimization	268
9.3.4	Application	273
9.3.5	Emergency response plan for roadway settlement	275
9.4	Construction technique for tunnelling under an operating railway	276
9.4.1	Project overview	276
9.4.2	Design and construction of tunnels using double layer support and bench methods	277
9.4.3	Mechanical behaviour of double layer support and bench methods	280
9.4.4	Key technologies of double layer support and bench methods and their applications	285
9.4.5	Preliminary plan for reinforcement of railways	287
References		288
Chapter 10 Stability and use of technology to protect entrance slopes of loess tunnels		289
10.1	Necessity for protection of entrance slopes of loess tunnels	289
10.1.1	Present status of entrance slope protection of loess tunnels	289
10.1.2	Significance of protection of entrance slopes of loess tunnels	289
10.2	Stability analysis of entrance slopes of loess tunnels	290
10.2.1	Factors influencing stability of entrance slopes of loess tunnels	290
10.2.2	Failure modes of entrance slopes of loess tunnels	291
10.2.3	Stability analysis of entrance slopes of loess tunnels	293



10.3	Use of technology to protect the entrance slopes of loess tunnels under the high-speed railway	297
10.3.1	Protection of entrance slope of loess tunnel in the Zhengzhou-Xi'an high-speed railway	297
10.3.2	Use of technology to protect the entrance slope of loess tunnels in high-speed railways	304
References		306
Chapter 11	Trends in development of loess tunnel construction technologies	307

第1章 绪论

本章主要介绍黄土的定义及我国黄土的分布及特征,分析我国黄土隧道建设历史与现状,明确黄土隧道断面等级及跨度划分,提出大断面黄土隧道建设所面临的技术问题,总结我国铁路在大断面黄土隧道建设中所取得的主要研究成果。

1.1 我国黄土的分布及特征

1.1.1 黄土的定义

黄土是第四系干旱、半干旱气候条件下,陆相沉积的一种特殊土^[1],颜色由黄至红黄、疏松多孔,粉沙质,质地均一,层理不明显,富含碳酸钙。它的内部物质成分和外部形态特征都不同于同时期的其他沉积物。一般认为不具层理的风成黄土为原生黄土,原生黄土经过流水冲刷、搬运和重新沉积而形成的黄土称为次生黄土,它常具有层理和砾石夹层。颗粒组成以粉粒为主,同时含有砂粒和黏粒。表层多具湿陷性,易产生潜蚀形成陷穴。黄土还含有大量可溶盐类,往往具有肉眼可见的大孔隙,孔隙比变化大多在1.0~1.1之间。

黄土按照形成时代分包括早更新世的午城黄土、中更新世的离石黄土、晚更新世的马兰黄土和全新世的新近堆积黄土、黄土状土等。黄土按照是否具有湿陷性又可以分为湿陷性黄土和非湿陷性黄土两大类。在一定压力下受水浸湿,土结构迅速破坏,并发生显著附加下沉的黄土称湿陷性黄土,它主要为后于晚更新世(Q_3)的马兰黄土以及属于全新世(Q_4)的黄土状土。这类土为形成年代较晚的新黄土,土质均匀或较为均匀,结构疏松,大孔隙发育,有较强烈的湿陷性。在一定压力下受水浸湿,土结构不破坏,并无显著附加下沉的黄土称非湿陷性黄土,一般属于中更新世(Q_2)的离石黄土和属于早更新世(Q_1)的午城黄土。这类形成年代久远的老黄土土质密实,颗粒均匀,无大孔隙或略具大孔隙结构,一般不具有湿陷性或仅具轻微湿陷性。

湿陷性黄土又分为自重湿陷性和非自重湿陷性黄土。在上覆土的自重应力下受水浸湿发生湿陷的黄土称自重湿陷性黄土;在大于上覆土的自重应力下(包括附加应力和土的自重应力)受水浸湿发生湿陷的黄土称非自重湿陷性黄土。

1.1.2 黄土的分布

黄土在全世界分布面积达1300万平方公里,约占陆地总面积的9.3%,主要分布在温带和沙漠前缘的半干旱地带。在北半球,黄土分布在北纬 $30^\circ \sim 55^\circ$ 之间地区;在南半球,黄土分布在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间的地区。

我国黄土以其分布范围广泛、连续、地层发育完整、厚度大而著称于世,分布在北纬 $30^\circ \sim 48^\circ$ 之间,以 $34^\circ \sim 39^\circ$ 之间最为发育,较之欧洲、北美的黄土分布区 $45^\circ \sim 62^\circ$ 稍靠南,分布面积约64万平方公里,其中湿陷性黄土约占四分之三。以西北地区 and 黄河中游地区最为发育,多分布于甘肃、陕西、山西地区,青海、宁夏、河南也有部分分布,其他如河北、山东、辽宁、黑龙江、内蒙古和新疆等省(区)也有零星分布。在西北地区、黄河中下游一带构成著名的黄土高原,连续面积达44万平方公里。

黄土覆盖厚度一般在100m以内,而以陇东、陕北、晋西黄土层最厚,六盘山以东到吕梁山西侧,黄