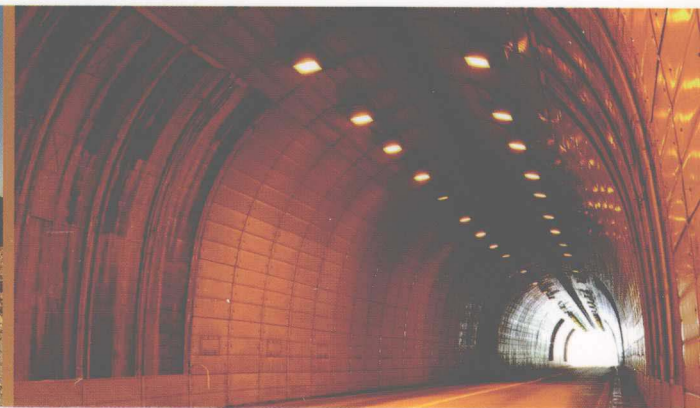


黄土公路隧道工程

HUANGTU GONGLU SUIDAO GONGCHENG

康 军 谢永利 李 睿 杨惠林 著



HUANGTU GONGLU
SUIDAO GONGCHENG



人民交通出版社
China Communications Press

Huangtu Gonglu Suidao Gongcheng
黄土公路隧道工程

康 军 谢永利 著
李 睿 杨惠林

人民交通出版社

内 容 提 要

本书针对黄土地区公路隧道的特点,提出了一系列不同于黄土地区铁路隧道建设的设计方法、施工工艺和数值指标,体现了我国黄土地区公路隧道建设的最新水平。详细介绍了黄土公路隧道工程性状实测、黄土公路隧道结构计算有限元技术、隧道结构及浸水对隧道结构受力性状影响、黄土公路隧道防排水技术、黄土公路隧道结构形式、黄土公路隧道施工技术、黄土公路隧道病害处治技术等内容。

本书可供公路隧道建设人员参考借鉴,亦可供大专院校相关专业师生学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

黄土公路隧道工程/康军等著. —北京:人民交通出版社, 2011.6
ISBN 978-7-114-09165-0

I. ①黄… II. ①康… III. ①黄土区—土质隧道:公路隧道—道路工程 IV. ①U459.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第107573号

书 名:黄土公路隧道工程

著 者:康 军 谢水利 李 睿 杨惠林

责任编辑:沈鸿雁 岑 瑜

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010) 59757969, 59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:720×960 1/16

印 张:16.25

字 数:284千

版 次:2011年7月 第1版

印 次:2011年7月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09165-0

定 价:35.00元

(如有印刷、装订质量问题,由本社负责调换)

前 言

黄土是第四系堆积的陆相沉积物,其特点是具有大孔隙、有垂直节理和管状孔道,天然含水率时强度较高,能维持很高的垂直边坡,但遇水时土颗粒崩解,表现为较强的湿陷性。黄土在我国有着广泛的分布,分布面积为 64 万 km^2 , 占国土面积的 6.3%。由于黄土分布的广泛性和典型的工程特性,历来受到工程界和学术界的重视。黄土洞室在我国发展很早,在新石器时代就有利用黄土洞穴的自稳条件开挖的洞室,至今还有一些地区的居民生活在其中。尽管黄土洞室应用已有几千年的历史,但由于黄土性质的限制,对黄土隧道设计计算理论的系统研究自 20 世纪 60 年代刚开始,并且与黄土的工程性质研究发展过程密切相关。近年来,随着国家基本建设力度的加大和西部大开发的深入,为适应日益增长的交通需求,越来越多的公路将穿越黄土地区,黄土隧道也随之增多。在原有铁路隧道建设的经验基础上,陆续修建了一些黄土公路隧道,如岷柳高速公路白虎山隧道、新庄岭隧道、土家湾隧道,兰海高速公路青土岫隧道,西兰公路(312 国道)彬县太峪隧道、永坪隧道,郑洛高速公路凤凰山隧道,铜黄高速公路楼子沟隧道;黄延高速公路 22 座隧道中就有道南隧道、新窑沟隧道等 19 座黄土隧道。这些工程表明我国在大跨度黄土隧道方面取得突破性进展,但在修建这些黄土隧道时,专家及工程技术人员也遇到了许多目前尚难以解决的关键问题,这些问题对专家们来说既是难得的机遇,也是严峻的挑战。

在此背景下,我们针对黄土公路隧道修筑技术开展了相关研究工作,本书主要内容取材于国家西部交通建设科技项目“黄土地区隧道的修筑技术研究”、国家西部交通建设科技项目“黄土地区公路隧道修筑技术推广应用研究”,以及甘肃省交通科技项目“公路黄土隧道围岩特性及支衬砌受力性状研究”的相关研究成果,同时吸收了近年来黄土隧道的多项工程专题研究的相关成果。全书结合大量已建和在建实体工程,系统研究了土体参数、衬砌参数、开挖进尺,以及埋置深度对围岩和衬砌结构受力与变形性状影响;分析了隧道结构受力性状及浸水对结构的影响;提出了深浅埋界定的新思路;推导了浅埋土质隧道围岩压力公式;总结出了黄土隧道防排水结构的设计原则;提出了黄土公路隧道的衬砌断面形式;给出了适合黄土隧道的施工方法;得出了黄土公路隧道的病害类型及各种

类型的处治方法。这些成果对黄土公路隧道的设计、施工及病害处治有一定的理论意义和工程实用价值,敬请国内同行关注。

本书主要由康军、谢永利、李睿、杨惠林四位著者统稿,另外参加本书编著的人员还有:张志勇、杨晓华、常学亮、周勤、赵彦龙、刘建勋、赵发章、周书友、韩友续、赵占厂、刘保健、杨世君、景 韧、袁永新、赵河清、孙世发、来弘鹏、袁德豪、李宁军、李又云、王亚琼、杨铁轮、李文斌、陈建军、刘秀霞、连富铤等。

感谢西部交通建设科技项目管理中心、甘肃省交通厅工程处、甘肃省交通规划勘察设计院有限责任公司等单位提供的资助。

鉴于著者的水平及认识的局限性,书中难免有不少错误和不足,恳请专家和读者批评指正。

作 者

二〇一一年三月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 黄土隧道特征	2
1.3 国内外研究概况	8
2 黄土公路隧道工程性状实测	22
2.1 依托工程概况	22
2.2 测试目的与实施技术	25
2.3 土家湾隧道测试结果分析	27
2.4 新庄岭隧道测试结果分析	32
2.5 白虎山隧道测试结果分析	39
2.6 青土岷隧道测试结果分析	46
2.7 小结	51
3 隧道结构计算有限元技术	53
3.1 概述	53
3.2 隧道结构数值仿真实论基础	53
3.3 隧道施工过程模拟	60
3.4 有限元程序研编	61
3.5 程序计算检验	64
4 黄土公路隧道受力变形性状	67
4.1 引言	67
4.2 土体参数影响性状分析	67
4.3 衬砌参数影响性状分析	77
4.4 开挖进尺影响性状分析	82
4.5 埋置深度影响性状分析	84
4.6 小结	86
5 隧道结构及浸水对隧道结构受力性状影响分析	87
5.1 隧道结构计算模型及参数	87
5.2 隧道结构计算结果及分析	88

5.3	浸水计算方法及参数	114
5.4	浸水对隧道结构影响计算结果及分析	115
5.5	小结	125
6	土质隧道围岩压力计算方法	129
6.1	现有计算方法评述	129
6.2	深浅埋隧道的界定	131
6.3	土质隧道围岩压力计算方法	133
7	黄土公路隧道防排水技术	137
7.1	黄土公路隧道地下水特性	137
7.2	黄土公路隧道渗涌水调查及渗涌水类型划分	140
7.3	黄土公路隧道防排水结构	143
7.4	工程实例分析	162
8	黄土公路隧道结构形式	171
8.1	引言	171
8.2	模型试验	172
8.3	数值仿真计算	183
8.4	黄土公路隧道结构形式	193
8.5	小结	196
9	黄土公路隧道施工技术	198
9.1	概述	198
9.2	黄土公路隧道施工技术	200
9.3	黄土公路隧道质量控制	209
9.4	工程实例分析	210
9.5	小结	213
10	黄土公路隧道病害处治技术	215
10.1	黄土公路隧道病害类型	215
10.2	黄土公路隧道病害成因分析	219
10.3	黄土公路隧道病害机制探讨	225
10.4	黄土公路隧道病害处治技术	228
10.5	小结	237
	参考文献	240

1 绪 论

1.1 引 言

在大多数工程中,隧道由于能缩短线路,改善线形,保护环境和根除病害,在我国高等级公路建设尤其是西部山区高速公路建设中,采用越岭长隧道方案,将越来越成为现实。几十年来,我国在隧道工程方面积累了丰富的经验,在勘测设计、施工方法、防水排水和运营防灾等技术方面有了很大进展。作为隧道建设经验的总结和进一步推动隧道建设的发展,交通运输部相继编写了《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)、《公路隧道施工技术规范》(JTG F60—2009)、《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)。

西部大开发战略决策的实施,促进了西部地区高等级公路的发展,穿越黄土地区的公路隧道将越来越多。黄土是第四系堆积的陆相沉积物,其特点是具有大孔隙、有垂直节理和管状孔道,天然含水率时强度较高,能维持很高的垂直边坡,但遇水时土颗粒会崩解,表现为较强的湿陷性。黄土在我国分布广泛,分布面积为64万 km^2 ,占国土面积的6.3%。由于黄土分布的广泛性和典型的工程特性,历来受到工程界和学术界的重视。黄土公路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》规定对黄土地区浅埋隧道围岩压力采用谢家体公式进行计算,而深埋隧道采用修正卡柯公式进行计算,并指出对黄土地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。这些建设经验的总结,基本体现了我国对黄土隧道的认识水平。公路隧道由于大跨径、大断面和扁坦状,以及防水等级较高;加上黄土强度较低,开挖扰动后变形大等特点,以及由此引起的设计施工方法的特殊性,铁路隧道业已达成广泛共识的优秀成果对于公路隧道是否适用,黄土公路隧道较多采用的两层模筑混凝土衬砌形式,每个组成部分的荷载特性如何?黄土公路隧道防排水设计是否得当?黄土公路隧道的结构形式和参数选取是否合理?现有设计及施工方法的合理性及经济性如何?黄土公路隧道存在那些病害及处治技术是否合理有效?一系列的问题都值得工程技术人员研究与思考。

1.2 黄土隧道特征

1.2.1 黄土的基本含义

黄土是第四纪干旱和半干旱气候条件下形成的一种特殊的大陆松散沉(堆)积物,形成时间最早在300万年以前,黄土地层距今约140~190万年,并在古地形地貌基础上继承性堆积形成幔覆结构。目前这种沉(堆)积仍在继续,形成第四系松散全新世黄土。黄土特定的形成环境,使其具有一系列独特的内部物质成分和外部形态特征,在地理分布上也有一定的规律性。

典型黄土具有以下特征:颜色以黄色、淡黄色、灰黄色和褐黄色为主;质地均一,颗粒以粉粒(0.075~0.005mm)成分为主,其含量在60%以上,几乎不含粒径大于0.25mm的颗粒;结构均匀无层理,垂直柱状节理、构造节理发育,天然条件下直立性较强;构造疏松具大空隙,多孔特征明显,含肉眼可见的大孔隙、虫孔、植物根孔等,孔内常有白色钙质、菌丝等,孔隙比较大(一般1.0左右);常含各种可溶盐,对土粒有一定的胶结作用,富含碳酸盐(含量约10%~30%),常形成结核;一般具有湿陷性,这些特征在区域分布和垂直剖面上略有变化。具有上述全部特征的黄土称为标准黄土,基本具有上述特征的黄土称为一般黄土。

1.2.2 黄土的成因类型

黄土的成因是指所有参与黄土形成过程的地质作用和影响黄土存在、变化的一切自然因素,包括了物质来源、搬运沉积方式以及黄土化(即成土作用)的三个地质过程,是从黄土物质的堆积到形成黄土的全部过程的统一体。黄土成因问题较复杂,假说较多,受气候和地域(环境)影响很大,作为一个地质问题在学术界争论了将近一个世纪。如果把所有稍有差别的说法都计算在内,其假说可达140多种,归纳起来主要有以下四种:

(1)风成说,由菲尔莱道特(Virletel Aust)于1857年提出。该学说认为黄土是由风旋搬运的粉尘堆积组成,风积黄土分布在黄土高原平坦的顶部和山坡上,堆积厚度大,一般无水平层理。按此假说黄土是一类特殊介质的土体,以风力搬运为主、自然堆积未经次生扰动的、无层理的黄色、褐黄色粉质含碳酸盐具有大孔隙的第四纪土状沉积物。该学说主要奠基人是奥布鲁切夫(C. B. Обручев),我国以刘东生、马容之、杨钟键为代表。

(2)水成说,包括赖尔(Chiyell)1834年提出的冲积说和弗里盖尔1868年提

出的坡积或洪积说以及湖相沉积。该学说认为搬运的主营力是水(雨水、河水等),水成黄土主要分布在河谷阶地或山坡坡脚,其厚度变化很大,具有明显的层理,常夹有砂、黏土、砾石等。我国以张伯声为代表。

(3)残积说,由贝尔格(Begel)于1916年提出,该学说认为黄土由各种极不相同的岩石风化和成壤作用,形成冰期的冰川、冰水冲积物和坡积物,在间冰期经黄土化作用而成,多分布在基岩山地上部,厚度不大。

(4)混合成因说,如王永焱(1961)提出的随地区不同、时代不同,以某种成因为主的混合成因说,以及张宗祜主张的坡积、洪积、风积等共同作用的学说。

黄土自然搬运的外营力主要是风旋、流水和重力。结合黄土的形成特点,一般风旋营力作用形成原生黄土,水营力和重力作用形成次生黄土。黄土以风成说的证据和支持者最多,最早在20世纪初曾由俄国地质学家奥布鲁切夫及德国地质学家李希霍芬提出了中国黄土的风成假说。以后在几十年的长时间内,大多数地质、地理等方面工作者都沿袭了这一观点,认为中国黄土是北部沙漠经风的吹扬搬运的粉土堆积而成。风成成因的观点在大多数的黄土研究者之间影响是相当广泛的。这一假说的基本点在于:黄土分布区位于沙漠区的南面,承受着北部沙漠吹来的粉土堆积,而且中国黄土的岩性成分变化也正好是北面较粗,向南逐渐变细;同时黄土分布的地貌位置可以在现代的不同地形高程之上。这些都是风成假说的依据。

1.2.3 黄土的分类

(1)按成因分

黄土按成因可分为原生黄土和次生黄土。典型无层理黄土称为原生黄土,常含有古土壤、钙质结核等,岩性均匀、不含砂砾夹层;原生黄土经流水冲刷、搬运、重力崩塌、风力再次搬运而堆积(重新沉积而形成),并含有砂砾、细砂砾,形成有层理的黄土质(状)土,称为次生黄土。原生黄土和次生黄土的主要区别有两点:①次生黄土具有明显的层理;②次生黄土成分复杂,常含有砂、砾、黏土等夹层或包体。

(2)按照学科范畴分

黄土按照学科范畴分为:①沉积岩石学:黄土,黄土状土;②地层地质学:全新世黄土,马兰黄土,离石黄土,午城黄土;新黄土,老黄土;③工程地质学:湿陷性黄土,非湿陷性黄土;自重湿陷性黄土,非自重湿陷性黄土;饱和黄土,非饱和黄土;粉土,粉质黏土。

1.2.4 黄土的分布特征

世界上的黄土主要分布在北半球的中纬度干旱及半干旱地带,南半球除南美洲外,其他地区很少有黄土分布,黄土分布面积约1300万 km^2 ,约占陆地面积的9.3%。中国黄土集中在北方,面积约64万 km^2 ,占国土面积的6.3%(其中原生黄土约占4.4%,次生黄土约占1.9%),见图1-1。黄土以中纬度地带干旱与半干旱条带状分布,不连续的东西延伸,分布于大陆冰盖的外围或沙漠的外围,受山脉地形和气候控制;戈壁、沙漠和黄土从北向南顺次呈带状排列。

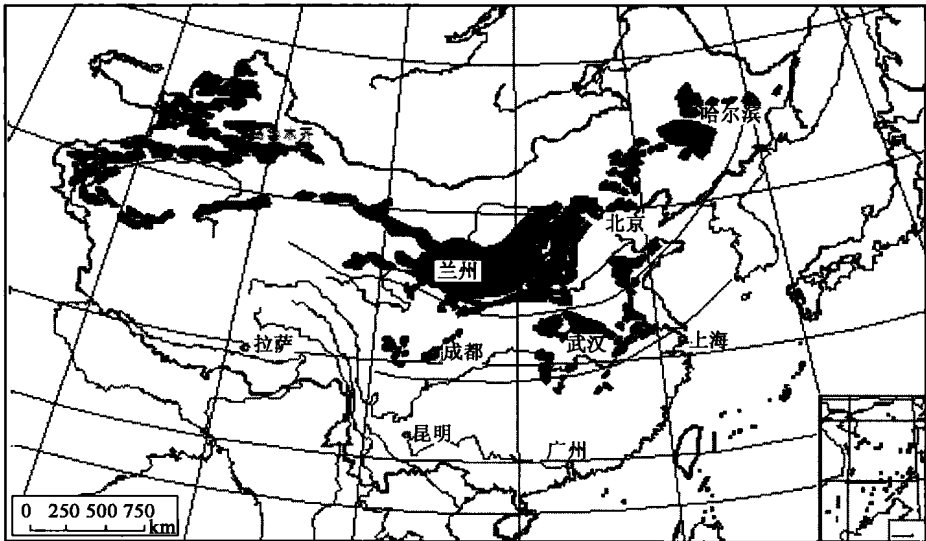


图1-1 中国黄土分布简图(据王景明等)

年均降水量小于250mm的地区,主要为沙漠和戈壁,很少出现黄土;大于750mm的地区,也基本上没有黄土。这说明黄土是在特定的地理位置和气候环境下堆积形成,黄土剖面是干冷与湿热气候频繁交替的记录。中国黄土分布自西向东可分为:①西北干燥内陆盆地区;②中部黄土高原区;③东部山前丘陵及平原区,尤其是西起贺兰山,东到太行山,北起长城,南到秦岭的黄河中游地区,黄土发育最好,地层全、厚度大、分布连续,面积约27万 km^2 。

如此大面积的黄土在我国中、西部的交通建设中,无疑是一个重要的施作对象;面临黄土塬、黄土梁、黄土峁与深切沟壑纵横交错的建设环境,隧道是必不可少的方案之一。

1.2.5 黄土的地貌特征

黄土地貌是第四纪黄土化作用和流水侵蚀作用共同塑造的,黄土在古地貌的基础上大面积堆积并随构造运动升降,在雨水冲刷、流水侵蚀、重力崩塌等营力因素作用下形成现今的塬、梁、峁与沟壑纵横交错的组合地貌,并且冲沟发育,深切黄土层;滑坡错落,表面流塌及串珠状陷穴等不良地质现象分布密集。总括起来说,黄土堆积的地质环境,按现代黄土地貌的不同而有所差异。黄土地貌主要有以下几类:

(1)黄土塬:具面积较大的平坦高地,有陡峻边缘,通常由黄土所构成,在黄土塬顶部表层广泛分布着黄土质土;多在前第四纪平坦基地上堆积起来的,黄土厚度最大,地层比较齐全;塬边是隧道穿越的对象。

(2)黄土梁:地形呈长条状的垄岗,两旁夹以深谷,垄岗高度大体保持一致,也是由黄土所构成,但也有少数上更新统和全新统新近堆积的黄土质土,如陇中、陇东、陕北、晋南、柴达木盆地香日德附近等地区;下伏基底起伏较大,黄土厚度变化也大,一般比塬区薄,地层也不如塬区齐全,是隧道穿越的主要对象。

(3)黄土峁:指个体独立或连续的黄土丘陵,由于地形严重切割,沟谷斜坡地带往往分布着新近沉积的湿陷性大的黄土质土;常造成隧道偏压。

(4)河谷阶地:包括现代河流的河漫滩、高漫滩、低级阶地、高级阶地及河谷范围内的各种斜坡地带以及河谷两侧的一些沟谷等地貌;往往是隧道的进出口段。

(5)冲积洪积平原:分布着全新统的黄土质土,一般具有较弱的湿陷性,当含黏土颗粒较多时,湿陷性较小或无湿陷性。如关中、河南、河北等黄土冲积洪积平原;一般不宜建隧道。

(6)黄土沟壑:黄土被深切割成深沟河流,往往露出基岩或红黏土,构成黄土地区的主要水系;黄土斜坡、塬边、梁峁岬局部等发育有小沟、小河,成为黄土地表水汇集的水网络。

1.2.6 黄土的地层特征

黄土经历了整个第四纪,直到现在仍在沉积,典型黄土地层划分及主要特征见表 1-1。根据中国黄土的标准地质剖面,黄土地层一般由上到下(由新到老)依次为全新世黄土、马兰黄土、离石黄土、午城黄土;土层层序之间存在一层或数层颜色变化较大的古土壤叠置层,底部一般埋藏第三系棕红色泥岩或紫红色砂岩。黄土层受地域影响,不同地层剖面差异较大,层序间存在缺失、不整合和假

整合现象;同一层序的厚度相差也较大。北方黄土地层还有明显的穿时性。

典型黄土地层划分及主要特征表

表 1-1

时代	名称	符号	主要特征	备注
全新世	全新世黄土	Q_4^{eol}	又称新近堆积黄土,岩性以粉土为主,多夹有粉细砂或粉质黏土;分布广,厚度不大,结构疏松,土质较均匀,孔隙发育往往含有有机物和植物根孔、真菌丝、蜗牛壳等;无层理;褐黄色为主,无古土壤	多有较明显的湿陷性;承载力一般小于 150kPa;锹挖极容易,进度很快。洞口段易塌方,开挖时地质灾害易发生
晚更新世	马兰黄土	Q_3^{eol}	岩性上部含粉土较多,下部含粉质黏土较多;含钙量较低,结构较疏松,土质均匀,大孔隙发育,有虫孔及植物根孔,有少量钙质结核,无层理;黄褐色	部分有湿陷性;易产生天然黄土桥及陷穴;承载力一般 150 ~ 250kPa;锹镐开挖容易,进度稍慢。其垂直节理对隧道影响大
中更新世	离石黄土	Q_2^{eol}	岩性一般以粉土、粉质黏土为主,偶夹有少量粉细砂;分布广,厚度大,富含钙质结核,结构较致密,土层较均匀,柱状节理发育,有多层古土壤;有少量大、中孔隙,无层理;棕黄色	一般无湿陷性;抗侵蚀能力较强,是黄土隧道的主体土层;承载力一般约 400kPa;锹镐开挖困难
早更新世	午城黄土	Q_1^{eol}	岩性一般为粉质黏土,含钙量高,钙质结核较多,结构致密,颗粒均匀,柱状节理发育,无大孔隙,无层理;棕红色	锹镐开挖很困难。埋深过大,厚度有限,一般不作隧道穿越土层

1.2.7 黄土的节理特征

黄土的构造是指土层的层理、裂隙和大孔隙等宏观特征。黄土是一种非连续介质,人们对引起大规模崩塌和冲沟溯源侵蚀的垂直节理认识较早,后来在路基和隧道工程中注意到存在的斜节理,即构造节理。黄土中发育有大量的可见节理,按成因可分为:原生节理、风化节理、滑塌节理、湿陷节理、卸荷节理、构造节理等,以构造节理对黄土隧道的影响最大。

原生节理有的与黄土微层理垂直,形成垂直节理,受控于黄土的多孔隙性和固结程度;有的近乎平行形成横向节理,断面呈贝壳状;有的斜交,构成黄土斜节理。结构面常常弯曲,构成不规则的复杂形状;一般不穿切所在黄土层,只局限于其中。马兰黄土中原生节理多且呈不规则棱柱体,节理面粗糙凸凹不平,有的闭合、有的微微张开,节理间距一般几个厘米;离石黄土中原生节理少,呈方柱状、块状,节理面光滑,且皆闭合、隐蔽。黄土中的垂直节理属于原生节理。

风化节理在原有原生节理、构造节理的基础上进一步打开、扩展、加密,使黄土分裂成块状而形成,主要发生在老黄土表层 0.5m 以上。离石黄土在水的冻融和大温差下风化加剧,迅速分裂成更细小的碎块,在重力作用下极易崩塌、脱落,故而黄土隧道应及时支护衬砌,边挖边衬。

滑塌节理由黄土滑坡和崩塌形成,常常张开成为张裂隙,节理面上多带有土体摩擦痕迹;湿陷节理主要在湿陷区边缘,在水的作用下地面出现湿陷节理区,有时形成漏斗和陷穴,他们都发生在局部。卸荷节理是黄土释去压缩力向自由空间膨胀,属于张节理,节理面弯曲与地形陡坎平行;隧道开挖后应力释放,易在洞壁、拱顶产生卸荷节理,对隧道稳定不利,需及时护衬砌。

构造节理由长期地应力作用形成,方向性强,近 SN 和 EN 两组扭裂最为常见。不受地形地物的影响;以压扭为主,力学性质清楚但隐现;贯穿黄土上下层,成为洞穴、井、盲沟等的构造基础。密度较稀,是统一的区域构造应力场的产物。黄土构造节理沿隧道洞轴线方向和垂直隧洞轴线方向最为发育,且一般为高倾角的斜节理,组成 X 形。

1.2.8 黄土隧道围岩变形规律

修筑在具有一定应力履历的黄土体中的隧道,其性质会受到隧道围岩性质的影响。隧道围岩即隧道附近黄土土体,它历经了多次的地质作用、经受过应力重分布,形成一定的岩土成分、一定的结构、赋存于一定的地质环境中。通过前面对黄土工程特性的总结论述,可见影响黄土隧道围岩变形的地质因素是黄土自身和隧道地质环境,其中黄土的工程特性是最基本的影响因素,是黄土隧道各类问题的根源。主要表现在以下几个方面:

(1) 黄土是第四纪干旱、半干旱气候条件下形成的一种特殊的大陆松散沉(堆)积物,以粉粒为主,包含细砂、粉土、黏粒等;黏粒含量较多时黄土内聚力较大,有利于隧道稳定。黄土的特殊成因和物质组成,决定了黄土隧道围岩结构较疏松,围岩类别差,通常被视为特殊类型的软弱围岩,故而隧道开挖后往往不能保持自稳,洞顶由于压力等作用下沉,产生大的变形。

(2) 黄土以中纬度地带干旱与半干旱条带状分布,不连续的东西延伸,分布于大陆冰盖的外围或沙漠的外围,受山脉地形和气候控制,在古地貌的基础上大面积堆积;黄土下伏基底起伏较大,黄土厚度变化也大。黄土地层一般由上到下(由新到老)依次为全新世黄土、马兰黄土、离石黄土、午城黄土;土层层序之间存在一层或数层颜色变化较大的古土壤叠置层,底部一般埋藏第三系棕红色泥岩或紫红色砂岩。黄土的特殊分布,决定了黄土层厚的不稳定性和岩性的复杂

性;黄土隧道主要穿越 Q_2 和 Q_3^1 黄土层,但洞口附近必然穿越 Q_3^2 、 Q_4 黄土层,而 Q_2 和 Q_3^1 黄土层中可能夹有砂层,隧道中部埋深较大时,还可能穿越第三系红黏土或与砂岩交界,使得黄土隧道围岩岩性变得复杂,其力学性质也变得复杂而不稳定,很容易在施工中产生大变形。

(3)黄土隧道围岩黄土体一般处于非饱和状态,这种天然条件下的三相状态,使黄土内部产生较强的基质吸力(分子力),与黄土的胶结力一起构成了黄土的结构强度,有利于黄土隧道的稳定,也正是黄土的这种结构强度使得黄土窑洞能自稳。但是,结构强度会随含水率的增加而迅速降低,土体很快由稳定状态转化为不稳定状态,造成塌方、垮塌等地质灾害;结构强度在水的作用下急剧降低是黄土隧道变形大的主要原因之一。

(4)黄土所具有的特殊物理力学性质使得黄土地层有一定的共性问题:地层承载力较低;无水黄土的黏滞系数大,围岩壁立性较好;侧应力较大。黄土的物理力学性质,尤其是 c 、 φ 值,地下水等工程特性,对隧道的开挖成洞性及围岩变形都有影响。围岩土体压缩性较低,一般属于中、低压缩性土体,故而在一定条件下的变形是有限的,有限的变形不能平衡应力重分布时就会产生松动,最后演变为塌方等大的地质灾害。

(5)黄土中含有相当数量的黏土和盐类,使黄土颗粒有一定程度的胶结,从而具有相当的原始内聚力,法向压力不大时抗剪强度与法向压力成正比;超过原始内聚力后抗剪强度显著降低;当黄土的含水率很低时,由于具有高凝聚强度,黄土剪切强度较高;当含水率增大时,黄土剪切强度降低,从而使围岩局部破坏,产生大变形甚至塌方。

(6)水敏感性对黄土的力学特性至关重要,黄土中的伊利石、蒙脱石等黏土矿物,具有较好的亲水性,在水作用下易形成空洞;水胶联合是黄土颗粒之间的主要联结形式,在干燥时赋予黄土相当高的强度,但遇水后联结削弱,强度显著降低,并且其削弱程度随水量的大小成比例变化。黄土垂直方向的渗透系数大于其水平方向的渗透系数,故而地下水垂直渗透较快,造成隧道很快湿水、渗漏,隧道围岩迅速被水软化,进而失去承载力。黄土隧道围岩的水敏感性是黄土隧道围岩变形的另一个重要影响因素。

1.3 国内外研究概况

前已述及,人类在开发和利用地下空间方面有着悠久的历史,在隧道建设方面已积累了丰富的经验。在隧道结构计算模型、围岩压力理论、隧道结构数值仿

真、模型试验及工程实测、施工方法及防排水技术等几个方面,主要研究成果现简述如下。

1.3.1 隧道结构计算模型^[91]

目前,可将隧道结构计算模型归结为四种:荷载结构模型、收敛约束模型、地层结构模型及经验类比模型。由于每一种方法均有一些假定和种种限制条件,因此若采用某种单一的计算模式,便不足以全面真实反映隧道结构在形式上的多样化,以及与围岩体相互作用而呈现的受力性态的复杂性,采用多种计算模式,将计算结果对比分析,可避免过分依赖某一种计算模式造成的工程风险。诚然,力学计算模式能否指导工程实践的一个根本前提,在于其能否适合并反映隧道工程的基本特点。

1. 荷载结构模型

荷载结构模型是《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)(以下简称《公隧规》)中推荐采用的一种方法,其设计原理是按围岩分类或由实用公式确定地层压力,按弹性地基上结构物的计算方法计算衬砌内力,并进行结构截面设计。采用这种设计计算模型,计算方法简单,工作量小,具有明确的安全系数评价方法,但其准确性将依赖于地层压力计算结果的真实性。地层压力的确定方法有很多,将在以后作进一步阐述。

2. 收敛约束模型

收敛约束模型在国际隧道界也占有一席之地。该模型认为围岩压力与支护抗力是在围岩与支护系统共同变形中形成的,它主要关心的是支护抗力作用下的地层状态,而不是荷载作用下的支护结构状态,设置支护结构的目的是阻止围岩体受力变形状态的恶化,而不是主动承担荷载,从而体现了新奥法围岩支承作用的思想,新奥法的基本理念是充分保护和发挥围岩的自承能力,但在具体应用时,存在很多难以解决的问题。首先目前仍无法正确地确定地层和支护的响应曲线,从而使该方法仍停留在定性的描述阶段,要作为隧道支护定量分析与设计的实用方法,还有许多理论上的难题需要解决,目前一般仅按照量测的洞周收敛值进行反馈和监控,以指导后继的隧道设计与施工。

3. 地层结构模型

地层结构模型将衬砌和地层视为共同受力的统一体系,按变形协调条件分别计算衬砌与地层的内力,并据以评价地层的稳定性和进行结构截面设计。该计算理论对一小部分课题已取得了精确的解析解,大部分课题的计算仍将依赖

于数值计算方法,20世纪70年代中期以来,随着电子计算机的广泛应用,特别是有限元、边界元、杂交元等数值方法的推广,为连续介质模型在隧道工程中的应用创造了条件。近年来,追求高精度、能考虑多种因素的数值仿真,已风行于各设计和科研部门,但其计算结果多数都没有用到工程实践上,只能为设计人员和方案决策者提供一个定性参考。随着高性能计算机的出现以及计算技术的不断完备,数值计算结果的准确性将极大依赖于介质本构关系的合理性和计算参数的准确性,由于这两个方面的不准确性,已经形成一个以模型识别和参数反演为主要内容的重大研究方向,并已在工程实践中显示了它的应用价值^[24]。

4. 经验类比模型

工程类比法在我国甚至于世界隧道及地下工程的设计领域占据主导地位。我国已成功修建的长14.295km的大瑶山铁路隧道以及长18.46km的秦岭终南山特长隧道,其结构设计都毫不例外地以工程类比方法为主,并辅以力学计算。根据经验总结而创立的新奥法(在我国称为喷锚构筑法)在预设计阶段,支护参数仍需采用工程类比经验方法来确定,即便是依据监控量测资料修正支护参数和施工方法,经验仍起决定作用。工程类比经验设计方法的关键在于建立正确的围岩分类体系,以及既有工程资料的积累和整理,现行的围岩分类带有很大的为人因素,仍是一个以定性为主的分类,工程类比也只是各单位仅依据有限的设计资料进行类比,这样进行的隧道支护设计,其功能的可靠性及经济的合理性,往往难以得到保障。

1.3.2 围岩压力理论

围岩压力理论一直是隧道与地下工程重要的研究课题,按荷载结构模型进行地下洞室衬砌设计时,围岩压力的确定是关键。根据围岩变形破坏机理,围岩压力可分为四类:即形变压力、松动压力、冲击压力和膨胀压力,实际上膨胀压力也是形变压力的一种。

20世纪20年代以前,主要是古典的压力理论阶段,这类理论认为作用在支护结构上的压力是其上覆岩土层的重力。随着开挖深度的增加,越来越多地发现古典压力理论不符合实际情况,于是又出现了散体压力理论,可以作为代表的有太沙基公式和普氏理论。长期以来,我国的地下洞室围岩压力计算大多采用了这两种理论,大量工程实践表明,以此计算的围岩压力与实测值有较大的差距。普氏理论认为在松散介质中开挖隧道后,在其上方将形成一个抛物线形的平衡拱,平衡拱内的岩块重力即为作用在衬砌上的围岩压力,普氏理论的主要缺陷是普氏坚固性系数是个笼统的指标,带有很大的经验性,它既有地质含义,又