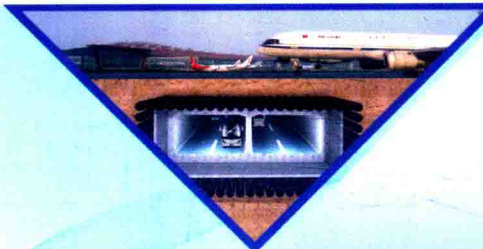


下穿机场隧道 修建技术

马栋 编著



科学出版社

下穿机场隧道修建技术

马 栋 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书共7章,以下穿首都机场L滑行道顶进箱涵工程和T2-T3航站楼连接线暗挖隧道工程施工关键技术为基础,针对飞机不停航条件下工程实施过程中面临的技术难题和施工风险,以工程科研项目为依托,通过数值模拟、模型试验、理论分析、现场监测和工程应用检验等手段,系统地总结机场跑道下隧道(顶进箱涵)工程超前支护、开挖、衬砌、道面沉降观测及控制等技术问题。本书主要内容包括绪论、飞机移动荷载与隧道结构相互作用、长大管幕支护力学特性、长大管幕施工技术、大断面隧道开挖及支护技术、大断面箱涵顶进施工技术、道面沉降监测方法及结果分析。

本书可供隧道及地下工程设计、施工、科研人员及高等院校土木工程专业师生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

下穿机场隧道修建技术 / 马栋编著. —北京:科学出版社,2019.6

ISBN 978-7-03-059972-8

I. ①下… II. ①马… III. ①机场建筑物-大断面地下建筑物-隧道施工 IV. ①V351.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第285196号

责任编辑:孙伯元 罗 娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 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 1/2

字数:368 000

定价:118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

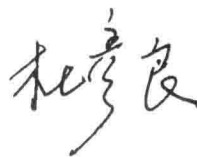
序

隧道和地下空间的开发和利用,进一步拓展了人类生存和发展的空间,受到各行各业的高度重视。我国已成为世界上隧道和地下工程数量最多、发展速度最快的国家。在建设过程中,工程活动的安全问题正引起人们的广泛关注,如何减小工程活动对地表建筑物、地面交通等周边环境的影响至关重要。目前关于隧道下穿既有建筑物、道路、铁路、河海等的课题已取得了不少研究成果,而修建下穿运营中机场跑道的地下通道工程,与其他穿越建筑物、构筑物的工程相比,面临更高的安全风险,有更高的施工控制要求,且国内外可供借鉴的经验不多。

该书的研究历时7年,在借鉴我国既有隧道及地下工程修建经验的基础上,以下穿首都机场L滑行道立交通道和T2-T3航站楼连接线暗挖隧道工程为依托,运用现场调研、理论分析、数值模拟、模型试验、现场反复验证等手段,围绕机场滑行道下顶进长大箱涵、不停航机场跑道下大断面隧道修建等关键难题,对该工程修建的理论方法和关键技术进行梳理、凝练和总结,指导了现场施工,解决了针对此类工程的下穿机场滑行道、主跑道施工技术难题。

该书涵盖飞机移动荷载与隧道结构相互作用机理、长大管幕支护力学特性及其施工技术、大断面隧道开挖及支护技术、跑道沉降自动监测及沉降控制技术等内容,提出了有参考价值的理念、原则和要点,丰富了我国地下工程浅埋暗挖技术和工程实践。

愿作者及其科研团队继续努力,为我国隧道和地下工程建设做出更大贡献!



中国工程院院士

2018年12月25日

前 言

北京首都国际机场是我国规模最大、运输生产最繁忙的大型国际航空港。机场内旅客中转、货物运输要通过机场外社会道路、场内环场路或横穿滑行道,飞机起降和场内服务车辆相互影响,制约了机场运营效率。为此,先后修建了下穿L滑行道立交通道和T2-T3航站楼连接线暗挖隧道,以彻底解决车辆横穿飞机跑道及滑行道给飞机正常起降带来的干扰和安全问题,改善场内交通运输条件。下穿L滑行道立交通道工程采用箱涵设计形式,长148.3m,断面尺寸13.7m(宽)×6.45m(高),涵顶覆土厚度3~6m,采用顶进技术施工;T2-T3航站楼连接线暗挖隧道工程长1621m,为单层双跨连拱式结构,结构最大埋深5.6m,主要位于潜水位以下粉质黏土层中,其中下穿不停航主跑道段隧道长232m,采用暗挖法施工。

工程施工面临着重大技术和安全风险的挑战:一是机场跑道沉降控制标准高,总沉降要求小于30mm,平整度要求小于1‰;二是跑道上飞机滑行、起飞、降落的密度大,隧道施工过程要承受频繁的飞机动载作用,(如A380飞机滑行荷载达600t);三是箱涵及隧道周边采用管棚(大管幕)进行超前支护,管棚(大管幕)施工的精度要求高且对跑道的沉降控制难度大,在国内外尚属首例;四是施工过程中飞机跑道的实时沉降监测难度高;五是施工安全风险高,超长管棚(大管幕)顶进施工、多导洞开挖、飞机跑道沉降实时监测等可能会影响相关跑道飞机的正常运营。

针对以上难题,中国铁建十六局集团有限公司联合北京交通大学、石家庄铁道大学等科研单位,组织科研攻关,开展了“机场滑行道下顶进长大箱涵技术”“不停航机场跑道下大断面隧道修建技术”课题研究。其中,“不停航机场跑道下大断面隧道修建技术”获得了北京市重大专项支持,研究成果分别获中国民用航空总局科学技术进步奖一等奖、北京市科学技术奖二等奖。研究成果在工程实践中得到了成功应用,有力控制了工程风险,保证了施工安全和质量。

本书以两项科技成果为基础,由课题负责人马栋策划,北京交通大学、中国铁建十六局集团有限公司等单位参与编写。第1章由马栋编写,介绍国内外工程技术现状、首都机场连接线工程特点和技术难点;第2章由孙晓静、谭忠盛编写,通过数值模拟和现场监测,分析飞机移动荷载对首都机场飞机跑道下隧道支护体系的

位移变化规律、受力特点的影响,为工程提供重要参考;第3章由谭忠盛、孙晓静编写,介绍不停航条件下暗挖隧道管幕模型试验,通过对不同管幕布置形式、不同管幕直径下浅埋暗挖过程的沉降及内力变化规律进行对比,总结长大管幕支护力学特性,为控制工程结构的整体下沉及地表沉降提供依据;第4章由马栋、张晓峰、黄立新编写,介绍长大管幕施工技术,重点介绍微型盾构掘进方向控制、钢管顶力控制、管幕保压与减阻技术;第5章由马栋、陈佑新、王武现、羿生钻编写,介绍平顶直墙隧道开挖支护、注浆、衬砌施工和飞机跑道沉降控制技术;第6章由马栋、陈佑新、黄立新编写,介绍 $\phi 325\text{mm}$ 管棚保护下长148m大断面箱涵顶进施工技术,主要包括大管棚超前预支护、小导洞及下滑道设计及施工、箱涵预制及顶进、顶进减阻、地表沉降控制技术;第7章由马栋、谭忠盛、孙国著编写,介绍道面沉降监测目的及控制标准、飞机跑道沉降监测方法、飞机跑道及滑行道沉降监测结果分析。

本书的编写得到王梦恕院士等专家学者的精心指导和帮助,本书参考了有关单位和专家的技术资料,并引用了其中部分内容及试验数据。与本书有关的工程项目在施工过程中得到科研合作单位、工程建设指挥部、监理单位和现场项目部广大技术人员的大力支持和积极配合,在此一并向他们致以诚挚而衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足,恳请读者予以批评指正。

马 栋

2018年5月18日

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 首都机场连接线工程概况	2
1.2.1 工程介绍	2
1.2.2 工程地质情况	5
1.2.3 支护结构及施工方法	9
1.3 工程难点分析	12
第 2 章 飞机移动荷载与隧道结构相互作用	14
2.1 概述	14
2.2 飞机动荷载模拟	15
2.2.1 A380 飞机外形及荷载参数	15
2.2.2 飞机活动状态分析	15
2.2.3 飞机动荷载简化方法	18
2.2.4 三维动力有限元分析模型建立	20
2.2.5 两种荷载作用下隧道结构的动力响应分析	26
2.3 飞机动荷载作用下跑道动力响应	27
2.3.1 计算工况选择	27
2.3.2 隧道上部 5 导洞开挖时(断面一)跑道动力响应分析	28
2.3.3 隧道 10 导洞全部贯穿时(断面二)跑道动力响应分析	31
2.3.4 隧道全部贯穿并施作竖墙时(断面三)跑道动力响应分析	35
2.3.5 隧道开挖留核心土 1 时(断面四)跑道动力响应分析	38
2.3.6 隧道开挖留核心土 2 时(断面五)跑道动力响应分析	42
2.4 飞机动荷载作用下隧道动力响应	47
2.4.1 计算工况选择	47
2.4.2 隧道上部 5 导洞开挖时(断面一)隧道动力响应分析	47

2.4.3	隧道 10 导洞全部贯穿时(断面二)隧道动力响应分析	54
2.4.4	隧道全部贯穿并施作竖墙时(断面三)隧道动力响应分析	63
2.4.5	隧道开挖留核心土 1 时(断面四)隧道动力响应分析	70
2.4.6	隧道开挖留核心土 2 时(断面五)隧道动力响应分析	77
2.4.7	施作竖墙前后隧道变形对比分析	86
2.4.8	考虑跑道板前后对比	89
2.4.9	飞机重复作用的影响	91
2.5	飞机动、静荷载作用下地表沉降及隧道结构监测数据分析	95
2.6	本章小结	98
第 3 章	长大管幕支护力学特性	101
3.1	概述	101
3.2	长大管幕模型试验设计	104
3.2.1	相似理论与模型试验原理	105
3.2.2	试验设备与模型制作	110
3.3	不同管幕布置形式模型试验对比分析	129
3.3.1	“口”字形管幕模型试验	129
3.3.2	“门”字形管幕模型试验	147
3.4	不同直径管幕设置模型试验对比分析	161
3.4.1	模型试验施工过程	161
3.4.2	试验数据对比	162
3.5	本章小结	175
第 4 章	长大管幕施工技术	176
4.1	概述	176
4.2	管幕法理论基础	177
4.3	微型盾构掘进技术	178
4.3.1	微型盾构选型	178
4.3.2	微型盾构机测控智能系统	179
4.3.3	管幕钢管顶力分析	180
4.3.4	管幕保压润滑与减阻	181
4.4	长大管幕施工技术	186
4.4.1	管幕布置形式	186
4.4.2	管幕施工	186

4.4.3 长大管幕低阻顶进技术	189
第5章 大断面隧道开挖及支护技术	192
5.1 概述	192
5.2 平顶直墙隧道开挖支护技术	193
5.2.1 管幕超前支护	193
5.2.2 土体超前预加固注浆	193
5.2.3 多导洞开挖支护	193
5.2.4 暗挖工艺流程	193
5.2.5 隧道开挖、支护、衬砌施工步序	194
5.2.6 多导洞暗挖施工操作要点	198
5.2.7 多导洞开挖支护与质量控制	200
5.2.8 多导洞施工安全控制	200
5.3 平顶直墙隧道注浆技术	200
5.3.1 管幕周边注浆	200
5.3.2 管幕上方土体注浆	200
5.3.3 掌子面前方深孔预注浆	201
5.3.4 初支背后注浆加固	205
5.3.5 初支与二衬间回填注浆施工	205
5.4 平顶直墙隧道衬砌施工技术	206
5.4.1 二衬施工原则	206
5.4.2 总体施工方案	208
5.4.3 初支、二衬施工工序及施工操作要点	210
5.4.4 接缝防水处理	216
5.5 飞机跑道沉降控制技术	219
5.5.1 暗挖施工产生沉降的主要原因	219
5.5.2 沉降控制方法	221
5.5.3 管幕内注浆工艺及质量控制	222
第6章 大断面箱涵顶进施工技术	227
6.1 大管棚超前预支护技术	227
6.1.1 管棚设计参数	227
6.1.2 管棚施工工艺和操作要点	228
6.2 小导洞及下滑道设计施工技术	231

6.2.1	工作坑施工	231
6.2.2	小导洞施工	231
6.2.3	下滑道施工	233
6.2.4	滑板、后背墙施工	233
6.3	箱涵预制及顶进技术	238
6.3.1	箱体预制	238
6.3.2	箱涵顶进过程力学特性	239
6.3.3	箱体顶进与就位	242
6.4	箱涵顶进减阻技术	245
6.4.1	化学泥浆的选取	245
6.4.2	化学泥浆施工方案	245
6.4.3	箱涵顶进中继间方案	247
6.5	地表沉降控制技术	251
6.5.1	影响地面沉降的主要因素	251
6.5.2	地表沉降预测分析	252
6.5.3	主要沉降控制方法	254
第7章	道面沉降监测方法及结果分析	256
7.1	道面沉降监测目的及控制标准	256
7.1.1	监测的目的	256
7.1.2	沉降控制标准	256
7.2	飞机跑道沉降监测方法	257
7.3	飞机跑道沉降监测结果分析	260
7.3.1	跑道面监测断面及测点布置	260
7.3.2	道面沉降监测结果	261
7.3.3	跑道面沉降结果分析	263
7.4	滑行道沉降监测结果分析	270
7.4.1	滑行道面监测断面及测点布置	270
7.4.2	滑行道面沉降结果分析	270
	参考文献	282

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

近年来,我国加快了开发利用隧道与地下空间的脚步^[1],成为世界上隧道和地下工程数量最多、发展速度最快的国家^[2]。在建设过程中,隧道开挖引起的环境安全问题正引起人们的广泛关注,减小隧道开挖对地表建筑物、地表路面交通等的影响至关重要^[3]。

目前,关于隧道穿越既有建筑物、道路、铁路、河流海峡等研究已取得不少成果,而修建下穿机场跑道的地下通道是一个较新的课题,与其他穿越建筑物、构筑物的工程相比,其安全风险控制及施工沉降控制要求更高,且国内外可供借鉴的经验不多。

国内外下穿公路、铁路、地铁、地表建筑物及地下构筑物的隧道工程实例较多,但下穿机场滑行道及飞机跑道的隧道工程很少,能检索到的工程只有以下几个。

在国外,2000年,瑞士在苏黎世国际机场运营区下修建了两条防水单壳地铁隧道。2001年,德国在斯图加特机场跑道下修建了圆形单轨隧道。

在国内,2007年,北京在首都国际机场采用箱涵顶进法施工穿越机场滑行道。2009年,上海修建的仙霞西路隧道穿越运营中的虹桥国际机场绕滑道、巡航道、导航灯基座等重要设施,采用大直径泥水盾构施工。

此外,上海浦东国际机场修建了东西垂直连接滑行道下穿二、三号地下通道;伦敦希斯罗国际机场在滑行道和站坪机位下方,采用内径 8.1m 的土压+气压双模式盾构修建了两个铁路隧道。

为了提高机场货运、客运效率,减少与飞机跑道及滑行道的相互交叉影响,首都国际机场先后开展了下穿 L 滑行道的立交通道工程和 T2-T3 航站楼连接线暗挖隧道工程。为不影响飞机的正常起降与机场的正常运营,隧道必须在不停航的条件下进行建造,地表沉降控制要求极为苛刻,施工技术难度也非常大。

本书基于上述工程所面临的技术难题,由施工单位联合高校、科研单位共同开展研究,取得了以下技术成果:大管棚超前护顶预支护技术,小导洞开挖技术,跟踪注浆技术,化学注浆润滑技术,衬砌分块施工技术,飞机移动荷载与隧道开挖相互作用理论分析方法,跑道沉降自动监测及沉降控制技术,地中位移光纤测试技术,长大管幕顶进技术,管内同步注浆技术,长大管幕导向技术,双向顶进合拢段暗挖

及接头处理技术,箱涵中继间与接头防水,曲线箱涵采用的顶进直涵,滑板、后背设计,掌子面预加固,顶进箱涵测控纠偏等,共计专利 15 项。其他成果还包括北京市科学技术奖二等奖 1 项、中国民用航空总局科学技术进步奖一等奖 1 项、工法 8 项、硕士学位论文 3 篇、科研论文 20 余篇。

1.2 首都机场连接线工程概况

1.2.1 工程介绍

1. T2-T3 航站楼连接线暗挖隧道工程

目前,受场内飞机跑道隔断影响,首都国际机场东区与西区旅客中转只能依附机场外社会道路和场内环场路。场外社会道路受交通拥堵影响,登机时间不能保障,场内道路需穿越多条滑行道与飞机相互交叉制约,并与场内服务车辆相互干扰,机场运营效率随着逐步增加的航班架次日趋下降。中央主跑道飞机起降频繁,跑道一旦停止运行,对机场影响不可估量,经济损失和政治影响更是不可想象。为了解决这一难题,中国民用航空总局批准修建 T2-T3 航站楼连接线工程。

该工程位于首都国际机场 T2 和 T3 航站楼之间,西端接入 T2 航站楼前停机坪和地面道路,东端接入 T3 航站楼的地面道路。隧道为单层双跨连拱式结构,两条隧道主体部分相互平行并垂直于下穿使用中的机场跑道。其中,一条隧道是以运输中转旅客为主的捷运隧道,如图 1.1 和图 1.2 所示,长 1621m;另一条隧道是通行行李拖车、配餐车、摆渡车为主的汽车隧道,长 1265m,隧道下穿不停航跑道段长 232m。隧道结构最大埋深 5.6m,隧道主要位于粉质黏土层中,大部分位于潜水位以下。该工程采用管幕保护下浅埋暗挖法施工。

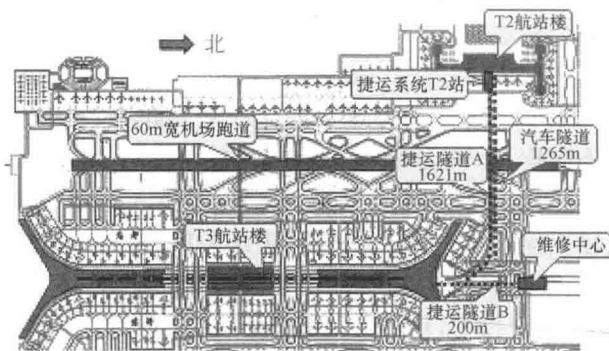


图 1.1 捷运隧道平面位置

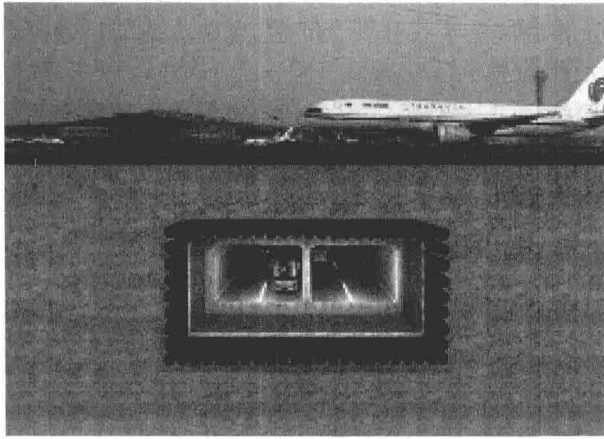


图 1.2 捷运隧道横剖面

标准截面总宽 23.2m,总高 8.55m,中间设置中墙;捷运隧道净宽 10.3m,结构净高 6.05m,汽车隧道净宽 10.1m,结构净高 5.07m。顶板厚 1.1m,底板厚 1.2m,边墙厚 1.0m,中墙厚 0.8m。将东西两侧暗挖隧道开挖面沿宽度方向分成五部分,沿高度方向分成两部分,总共 10 个导洞,导洞划分情况及管幕布置如图 1.3 所示。

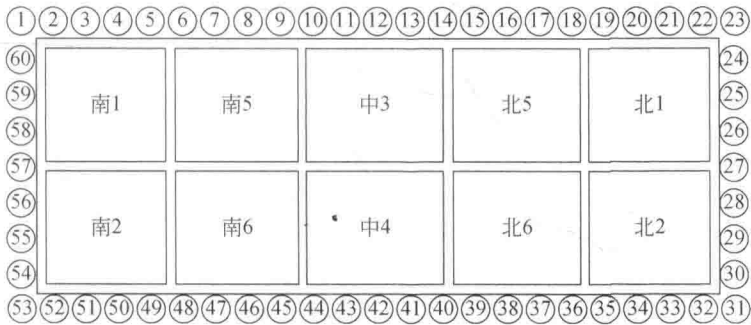


图 1.3 导洞划分情况及管幕布置示意图

2. 首都机场 L 滑行道下顶进箱涵工程

首都国际机场西跑道是国际航班起降的主要跑道,连接西跑道与 4 号停机坪及 T2 航站楼停机坪的 L 滑行道是机场最繁忙的滑行道之一^[4]。该滑行道不仅承担飞机的滑行,也是机场南区国航货运调往北区货场及 T1、T2 航站楼之间必须平交横穿的滑道。货车往返均要与滑行的飞机互让,这经常导致航班停滑和排队等候。这种情况不但影响航班的正常起飞并造成大量的货物积压,给机场带来巨大

的经济损失,而且严重影响航班正常起降和滑行安全。为了彻底解决货运车横穿L滑行道对飞机正常起降的干扰和安全隐患,大幅提高货运效率,中国民用航空总局批准新建下穿L滑行道的立交通道工程。

该工程采用箱涵顶进技术施工,采用超前管棚进行预加固。立交跑道总长、顶进箱涵和超前管棚长度均为148.3m,顶进箱涵与L滑行道轴线的平面夹角约为 45° ,其平面布置情况如图1.4所示,施工现场如图1.5所示。

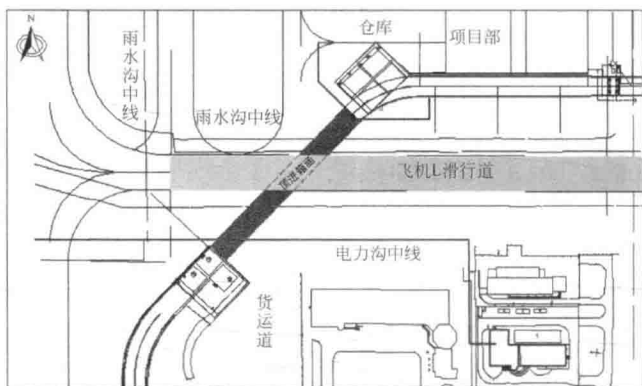


图 1.4 箱涵顶进平面布置示意图



图 1.5 箱涵顶进施工现场

该工程断面尺寸宽13.7m,高6.45m,涵内每孔净空尺寸宽6m,高5m,管棚采用 $\phi 325\text{mm} \times 10\text{mm}$ 螺旋钢管,如图1.6所示。涵顶覆土厚度3~6m,其中道面厚0.4m,二灰混料0.4m,人工填土2m。

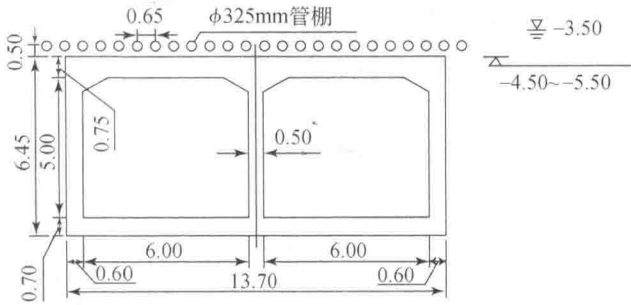


图 1.6 大管棚下顶进箱涵断面尺寸(单位:m)

1.2.2 工程地质情况

1. 地质概况

场地位于北京平原区的东北部,温榆河、小中河之间的二级阶地及一级阶地之上。场地地势西北高、东南低。由于机场管制及工程所在地的特殊性,主跑道及滑行道所处范围 210m 的地质情况不明,仅在东、西工作井位置进行勘察,勘察结果如图 1.7 和图 1.8 所示。

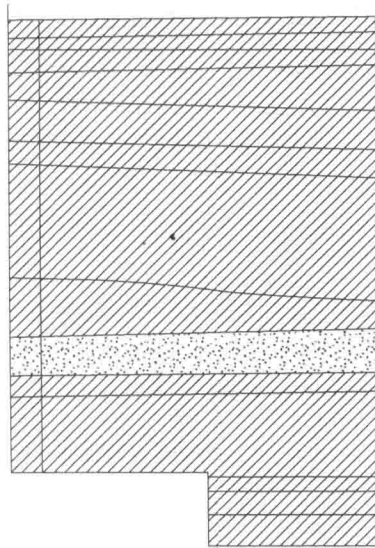


图 1.7 东区地质剖面图

勘察揭露 40m 深度范围内,地层表层为人工填土,其下为一般第四纪冲洪积成因的黏性土、粉土、砂类土。各土层的岩性特征详述如下。

续表

岩土名称	深度 /m	厚度 /m	容许承载力/kPa	压缩模量 E_s /MPa	重度 γ /(kN/m^3)	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa
黏土② ₂ 层	4.3~5.4	1.1	110	3.13	19.3	0.35	18	30.4
粉土② ₁ 层	5.4~6.9	1.5	110	5.31	18.2	0.35	18.1	30.6
粉土③ ₂ 层	6.9~8	1.1	160	12.26	20.4	0.3	30	28
黏土③ ₁ 层	8~12	4	120	9.77	18.3	0.4	12	39.7
粉质黏土③层	12~14	2	130	5.76	19.9	0.35	14.1	20
黏土③ ₃ 层	14~16.2	2.2	120	9.77	18.3	0.4	12	39.7
粉土③ ₄ 层	16.2~19.5	3.3	160	12.26	20.4	0.3	18	28
中砂④层	19.5~23.5	4	200	20	19	0.25	28	28
细砂⑤ ₃ 层	23.5~25.9	2.4	200	15	19	0.28	28	45
粉质黏土⑤层	25.9~27.2	1.5	180	11.7	19.8	0.35	18	28
粉土⑤ ₁ 层	27.2~30.5	3.3	200	17.28	20.1	0.3	28	34
粉土⑥层	30.5~31.9	1.4	200	21.5	20.7	0.3	30	34
黏土⑥ ₁ 层	31.9~33.10	1.2	160	11.27	18.7	0.4	15	49
粉土⑥层	33.1~35.0	1.9	200	21.5	20.7	0.3	30	34

进行加权平均计算,土层主要参数如表 1.2 所示。

表 1.2 土层加权参数

参数	压缩模量 E_s/MPa	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa
加权平均值	12.20	19.6	0.33	20.58	31.80

下穿主跑道暗挖隧道工程地质剖面如图 1.9 所示。

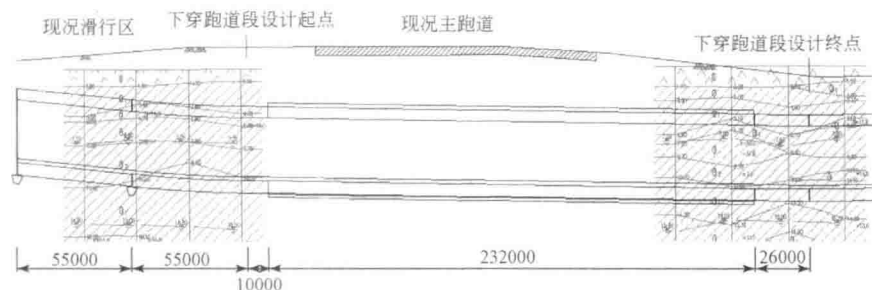


图 1.9 下穿主跑道暗挖隧道工程地质剖面(单位:mm)