



地铁隧道下穿公路诱发地层变形 理论与控制技术

武科 任立志 胡德华 著
段景川 高明 张文



科学出版社

地铁隧道下穿公路讲 理论与控制技术

武 科 任立志 胡德华 著
段景川 高 明 张 文

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书依托城市轨道交通建设工程,以揭示上软下硬地层矿山法地铁隧道近距离平行下穿高速公路支护结构与地层变形规律为目标,详述在建工程的关键问题与难点,分析现阶段国内外研究现状,采用工程经验法和地质物探方法阐述地质灾害特性,基于数值计算与现场试验揭示隧道支护结构与地层变形机理,提出下穿高速公路的隧道风险源分析与变形控制标准及风险等级,最终形成上软下硬地层矿山法地铁隧道近距离平行下穿高速公路施工关键技术。本书在地质灾害分析、数值计算理论、风险分析与评估、工程建设等多方面的介绍具有独到之处,解决了城市轨道交通近接工程施工中的关键技术,为该方向的研究者提供了理论基础与新施工技术。

本书适用于从事地下工程设计、施工、监理、研究等领域教学、科研与开发的教师、学生、研发人员等广大读者。

图书在版编目(CIP)数据

地铁隧道下穿公路诱发地层变形理论与控制技术 / 武科等著. —北京: 科学出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-03-051118-8

I. ①地… II. ①武… III. ①地铁隧道-公路穿越-隧道施工-研究
IV. ①U459.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 314251 号

责任编辑:孙伯元 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:熙望国际

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张:9 1/4 彩插:8

字数:174 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着中国大型与超大型城市规模不断扩大,城市开发强度不断提高,城市人口密度快速增加,不仅城市地面建筑密集发展,城市地下空间也得以逐步大规模开发利用。城市地下交通枢纽工程已成为一种重要的城市地下空间结构,为城市居民提供了便捷的交通换乘。然而,新建地铁区间隧道工程穿越既有地面线的概率也越来越大。无论采用何种施工工法,均会造成下穿区域地层变形移动,下穿区域的地层变形移动不仅引起地表不均匀沉降,而且导致地表或地下中的既有构筑物结构变形。因此,面对日趋增多的地铁隧道穿越工程,如何确保其穿越既有地面线的行车安全及正常运营和既有结构物的稳定成为目前地铁隧道施工近距离穿越工程中亟待解决的问题,特别是对于以路基为基础的高速公路、城市快车道等重要交通枢纽,对穿越工程所产生的变形影响极为敏感。

本书依托深圳市新建地铁7号线深云村站—农林站区间段多次下穿既有高速公路和城市道理建设工程,重点阐述上软下硬地层矿山法地铁隧道近距离平行下穿高速公路施工工艺与辅助措施,揭示上软下硬地层矿山法近距离平行隧道支护结构受力与围岩变形规律及其地表变形特征,提出上软下硬地层矿山法地铁隧道近距离平行下穿高速公路的风险源分析方法与变形控制标准,以期能为地铁区间隧道下穿既有地面结构工程建设提供借鉴和参考。本书中有些内容也只是初步成果,目前正在进行更深入的研究工作。

由于作者水平所限,书中不足之处在所难免,敬请读者提出宝贵的批评意见。

目 录

前言

第 1 章 工程背景与科学意义	1
1.1 工程概况	1
1.2 工程特点和难点	2
第 2 章 国内外研究现状与发展动态	4
2.1 国内外研究现状与发展动态分析	4
2.1.1 地铁施工引起土体变形研究现状	4
2.1.2 下穿工程施工引起既有结构物变形研究现状	14
2.1.3 地铁隧道施工围岩稳定性分析研究现状	19
2.2 主要内容	24
第 3 章 工程水文地质分析	26
3.1 工程水文地质分析	26
3.2 地质物探	29
3.2.1 探测测线布置	30
3.2.2 探测结果分析	31
3.3 小结	34
第 4 章 “大管棚+全断面注浆+爆破振速控制”综合施工关键技术	36
4.1 超前地质预报	36
4.2 超前大管棚	37
4.3 超前全断面注浆	39
4.3.1 工艺原理	39
4.3.2 特点	39
4.3.3 工艺流程	40

4.3.4	施工步骤	40
4.3.5	材料及配比	42
4.3.6	机具设备	42
4.4	开挖施工	42
4.4.1	环形台阶法	42
4.4.2	钻爆施工	44
4.5	小结	46
第5章	隧道支护结构受力与围岩变形机理及其地表沉降规律研究	47
5.1	理论分析	47
5.1.1	隧道施工引起地表变形和破坏模式	48
5.1.2	隧道施工对高速公路的影响及破坏形式	50
5.1.3	隧道下穿施工引起既有高速公路沉降变形的基本规律分析	55
5.2	信息化施工监测	56
5.2.1	现场监测内容	57
5.2.2	现场监测控制网的布置	57
5.2.3	现场监测点的埋设及施工监测方法	59
5.2.4	现场监测频率及报警值	65
5.2.5	监测数据整理	65
5.2.6	隧道初支内力及支护效果评价	72
5.2.7	上软下硬地层矿山法隧道围岩变形规律研究	74
5.2.8	隧道下穿施工引起既有高速公路沉降变形的特殊规律分析	78
5.2.9	灰色系统预测	87
5.3	下穿隧道施工力学分析与空间效应研究	91
5.3.1	数值试验方案与模型建立	92
5.3.2	下穿既有高速公路路基沉降规律分析	94
5.3.3	下穿隧道围岩变形规律分析	96
5.3.4	下穿隧道地表振动特征分析	100
5.4	小结	106

第 6 章 下穿高速公路的隧道风险源分析与变形控制标准及风险等级	
研究	110
6.1 下穿既有高速工程风险源分析	110
6.2 下穿既有高速公路变形控制标准	113
6.2.1 变形控制标准的制定原则	114
6.2.2 下穿既有高速公路地面的变形控制指标体系	114
6.2.3 下穿既有高速公路变形控制标准的确定	117
6.3 下穿既有高速公路风险评估	117
6.3.1 模糊数学法基本原理	117
6.3.2 隧道下穿既有高速公路风险分析	120
6.3.3 下穿既有高速公路的风险预警机制	122
6.4 应急措施	125
6.4.1 暗挖隧道防止下沉所采取的措施	125
6.4.2 防止隧道土体坍塌的措施	126
6.4.3 突然涌水、涌砂预防处理措施	127
6.4.4 管线保护预防处理措施	127
6.5 小结	128
第 7 章 总结与展望	130
7.1 总结	130
7.2 展望	131
参考文献	132
彩图	

第 1 章 工程背景与科学意义

1.1 工程概况

深圳地铁 7 号线覆盖中心城区主要交通拥挤地区和二级交通需求走廊,衔接福田—罗湖中心外围的客流集散点,建成后可将罗湖、福田和南山有机地结合起来,缓解华强片区的交通压力,引导、拉动待开发地区经济、交通发展,是连接深圳特区内南半环主要居住区与就业区的线路,具有重要的意义。深圳地铁 7 号线东起罗湖区太安路,西至丽水路。线路全长约 29.798km。全线共设车站 27 座,其中设 12 座换乘站。全部为地下车站,平均站间距约为 1.048km。7 号线与深圳市城市轨道交通已建成的 1 号线、2 号线、3 号线、4 号线、5 号线和在建的 9 号线、11 号线及规划的 10 号线、14 号线、15 号线等 10 条轨道交通交叉换乘。其中,深云村站—农林站区间段下穿广深高速 4 次,如图 1.1 和表 1.1 所示。且该段下穿区域主要为第四系全新统人工填筑土、砾(砂)质黏性土,下伏基岩为燕山期花岗岩。区间隧道埋深较大,穿越地层多为强—微风化岩,施工难度很大^[1]。

其中,下穿广深高速地层及环境的基本特点为:原状残积土厚达 16~20m 的沙质土及杂填土、高速公路填土路基及路面结构,隧道洞身上部是残积土(局部是回填土),下部是岩石,并且富含水,严重影响穿越工程施工及广深高速公路的安全。



图 1.1 工程平面图

表 1.1 安农区间隧道下穿广深高速公路汇总表

位置	里程	长度/m	围岩级别	埋深/m	施工方法
左线	DK10+763.009~DK10+830.390	67.381	V、IV	约 20	台阶法
右线	DK10+751.884~DK10+811.004	59.12	III、IV、V	约 20	全断面法
左线	DK11+105.387~DK11+214.776	109.389	II、III	约 20	台阶法
右线	DK11+153.549~DK11+257.956	104.407	IV、V	约 21	台阶法

1.2 工程特点和难点

本工程所处的周边环境、地质条件和隧道结构的特殊性,决定了工程所具有的特点和难点如下:

(1)地处上软下硬软弱地层,工程地质条件差,施工防坍、防地面(特别是广深高速)过量下沉是技术难点。

(2) 由于下穿广深高速特殊要求,下穿区域无法在地面采取相关控制措施,以矿山法和洞内为主的工程技术增加了建设难度。

(3) 为确保广深高速公路交通顺畅,该区域下穿工程采用了“超前加固(超前小导管或管棚)+上下台阶施工+洞内环形径向注浆+仰拱及时跟进施做”等工程措施。

(4) 下穿区域地表和洞内隧道围岩变形严格控制,建立信息化预警机制和风险分级管理措施,以保证隧道安全、稳定下穿广深高速公路。

(5) 区间隧道埋深浅、多位于富水风化花岗岩残积土地层中,地下水丰富且水位高,渗透性强,施工过程中失水沉降明显,综合沉降一般超过变形控制标准。采取何种技术措施既加固围岩又确保发挥良好的堵水效果,是该区间施工需要解决的技术难点。

(6) 工期矛盾非常突出。施工前期,由于对地层软硬程度估计不足,工程严重受阻,仅在2013年6月中旬位于大里程近广深高速区域施工中发生一次小规模坍塌,工期滞后。严峻形势迫使工程建设者尽快寻找一套在上软下硬地层矿山法隧道下穿国家高等级公路的综合施工技术。

第 2 章 国内外研究现状与发展动态

2.1 国内外研究现状与发展动态分析

随着城市的发展,地面建筑日益密集,地面空间的利用率趋于饱和。避开地面建筑物进行新线选址日趋困难。新建地铁区间隧道工程穿越既有地面线的概率也越来越大。无论采用何种施工方法,均会造成下穿区域地层变形移动,下穿区域的地层变形移动不仅引起地表不均匀沉降,而且导致地表或地下的既有构筑物结构变形。因此,面对日趋增多的地铁隧道穿越工程,如何确保其穿越既有地面线的行车安全及正常运营和既有结构物的稳定成为目前地铁隧道施工近距离穿越工程中亟待解决的问题,特别是对于以路基为基础的高速公路、城市快车道等重要交通枢纽,穿越工程所产生的变形影响极为敏感^[2]。

2.1.1 地铁施工引起土体变形研究现状

由国内外大量研究文献可以看出,由于地铁隧道施工是在土体内部进行的,无论地层状况好坏、埋深大小,隧道施工都会对周围的岩土体带来扰动,破坏土体原有的平衡状态。这种土体的扰动是不可避免的,它包括施工过程中对土体的加载与卸载、挤压与松动、孔隙水压的变化等。这些土体的扰动会造成岩土体的地层损失,进而导致地表沉降。一方面,隧道开挖造成地层损失,周围土体在弥补地层损失的过程中发生地层移动,引起地表沉降;另一方面,隧道施工扰动土体、造成地下水流失,破坏原始水土平衡,引起周围土体内部孔隙水压力的变化,使地层发生排水固结,引起地表沉降,而且土体的蠕变也可能导致地表发生一定的沉降。因此,无论采取何种隧道施

工方法,都将或多或少地引起地表沉降^[2]。

1. 地铁施工诱发的地层变形机理

1) 地层初始应力状态分析

(1) 地层应力状态。

城市地铁施工释放了开挖区域的初始地应力,诱发下穿区域地层自下而上的沉降变形,引起相关地层初始应力状态的改变,从而形成下穿区域地层的二次应力场重分布,即地层初始应力场与开挖引起的附加应力场叠加而成的应力场,对应二次应力场开挖的位移场仅是由开挖引起的附加应力场^[3]。因此,地层变形机理是地铁隧道施工开挖诱发掌子面初始地应力释放,产生二次应力重新分布,致使下穿区域地层自下而上的弹塑性变形。

(2) 地层应力状态改变的主要原因。

通过地层应力状态分析可知,地层应力状态改变的主要原因是地铁隧道施工开挖致使地层产生扰动,造成地层损失,产生的附加应力作用在地层中使其变形,同时地下水渗流引起的地下水位变化及产生的渗流压力也会诱发地层应力状态改变^[4]。

(3) 地层应力状态分析的理论方法。

荷载结构方法和地层结构方法是地下工程结构稳定性计算的常用方法。荷载结构方法认为,地层对结构的作用只是产生作用在地下结构的荷载,只计算结构在荷载作用下产生的内力与变形,相应地表变形分析主要采用经验公式方法。地层结构方法认为,结构与地层一起构成受力与变形的整体,按连续介质力学理论来计算结构和周围地层的内力与变形;地层结构法可以根据地层岩土材料的本构关系使用线弹性、非线性弹性、黏弹性、弹塑性和黏弹塑性等多种计算模型进行分析,然而由于数学上的困难,目前获得的精确解析解非常有限,大多数问题都依赖于数值解来计算^[5]。

(4) 施工诱发地层变形机理。

地铁隧道施工改变了开挖区域岩土体原始应力状态,从而引发开挖区域岩土体变形,开挖区域岩土体的沉降变形致使自下而上逐级地层原始应

力发生改变。当内层围岩向隧道内位移后,由于应力的调整,相邻的围岩也随之向隧道内位移,一直到由于切向应力的作用在围岩中达到新的平衡时才进入初步稳定状态,这种应力—位移的交替变化会逐渐向远离洞周的地层深部发展。其发展的深度和变化数值取决于围岩状况、隧道跨度、所使用的施工方法以及隧道埋深^[6]。

(5)地层损失理论。

地铁隧道施工引起的地层损失与其周围土体受扰动,或受剪切破坏的重塑土再固结,都是地层变形的基本原因。而作为解析地铁隧道施工引起的地层损失导致地层变形的的方法之一,地层损失理论极其重要。

地层损失是地铁隧道施工中挖土体体积和建成隧道体积之差。建成隧道体积包括隧道外围包裹的压入浆体体积,地层损失率以占隧道理论排土体积的百分比表示。周围土体在弥补地层损失中,地层发生变形,引起地面沉降。引起地层损失的因素主要是开挖面土体移动。隧道开挖面土体受到水平支护应力小于原则侧向应力,则开挖面土体向掌子面内移动,引起地层损失,而导致隧道上方地面沉降。与此同时,隧道施工引起的地层损失可分为三类。①正常的地层损失。一般这种地层损失可以控制到一定限度,可通过变形弥补地层损失,因此施工沉降槽体积与地层损失相等。在均匀地质中,这种地层损失引起的地面沉降比较均匀。②不正常的地层损失。由于隧道开挖支护不及时、开挖面超挖等,这种地层损失引起的地面沉降有局部变化的特征,如局部变化大,一般还可以认为是正常的。③灾害性的地层损失。隧道开挖面发生的土体急剧流动或突发性的崩塌,引起灾害性地面沉降^[7]。

2)下穿区域岩土体的固结沉降

城市中地下水位基本都在地铁隧道上方,随着隧道开挖扰动,周围地层逐步向隧道内部渗流,产生土体的固结。随之而来的则是土体变形量的增大,对城市隧道施工造成比较大的影响。

(1)土体的固结沉降机理。

天然土体是固、液、气三相耦合体系。土体的变形主要是由气体的压缩

排出和孔隙水的流失造成的。

土体的固结变形是时间的函数,随着孔隙水的排出和孔隙水压力的逐渐消散,有效应力逐渐增加,土体骨架产生瞬时变形及蠕变。有效应力减小后,部分变形为弹性变形,可以回弹;部分变形为塑性变形,不可以回弹。综上所述,土体的固结变形包含瞬时弹性变形、瞬时塑性变形、蠕动弹性变形和蠕动塑性变形四部分变形形式^[8]。

(2) 隧道围岩固结沉降原因。

根据隧道施工的方法和特点,隧道围岩和土体固结沉降的主要原因如下:

- ①地下水水位下降引起的固结沉降。
- ②孔隙水压力变化,引起土体的固结沉降。
- ③围岩扰动后,重新固结产生沉降。
- ④围岩的次固结和流变。

对于土体固结沉降的定量描述,目前主流是采用固结理论和数理回归分析方法。

(3) 固结沉降的计算理论。

① 太沙基固结理论。

太沙基(Terzaghi)提出了太沙基固结理论,并建立了单向固结基本微分方程,获得了一定初始条件和边界条件下的解析解,并做了如下假定:土体是均匀的、完全饱和的理想弹性材料;土体变形是微小的;土颗粒和孔隙水均不可压缩;孔隙水渗流服从达西定律,渗透系数为常数;荷载一次瞬时施加并维持不变,土体承受的总应力不随时间变化;土体中只发生竖向压缩变形和竖向孔隙水渗流。

② 比奥固结理论。

鉴于太沙基固结理论只适用于一维情况,比奥(Biot)假定在固结过程中法向总应力和应变不随时间变化,从而分析得出准确反映孔隙压力消散与土骨架变形相互关系的三维固结方程。

2. 确定地表沉降的方法及评述

关于由隧道开挖引起的沉降问题国内外研究比较多,理论与方法也比较丰富。

1) 经验法

(1) 横断面地表沉降。

Martos 发现隧道开挖所引起的地表沉降槽符合高斯分布。1969 年, Peck 根据大量的实践经验提出 Peck 公式,即在假定地层损失在整个隧道长度上均匀分布的条件下,认为隧道开挖所形成的地表沉降槽的体积与地层损失的体积相等,并且沉降横向分布可以近似为正态分布曲线^[9],如图 2.1 所示,并由此得出相应的计算公式。

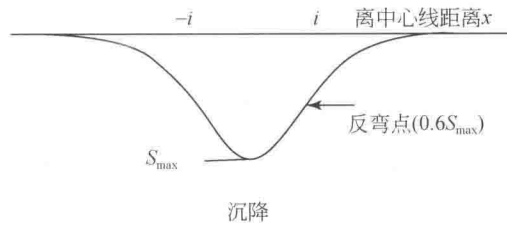


图 2.1 地表横向沉降槽预测示意图

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (2-1)$$

式中, $S(x)$ 为距离隧道中心轴线为 x 处的地表沉降; i 为地表沉降槽宽度系数; 自隧道中心至沉降曲线反弯点的距离, 沉降槽大体宽度的 $1/2$ 可以取为 $\sqrt{2\pi}i$, 约等于 $2.5i$; S_{\max} 为隧道中心线处地表最大沉降量:

$$S_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi}i} \quad (2-2)$$

式中, V_s 为施工引起的隧道单位长度地层损失。所谓地层损失, 是指隧道施工中实际开挖的土体体积与竣工隧道体积之差, 竣工隧道体积还包括隧道周边包裹的压入浆体体积。

Peck 公式有两个重要参数:沉降槽宽度系数 i 和地层损失 V_s 。这两个参数的正确选取对最终的预测结果起决定性作用。

①沉降槽宽度系数 i 的确定。

许多专家学者根据相关的经验以及研究给出了 i 的计算公式。

Clough 等针对饱和塑性黏土提出了式(2-3)^[10]:

$$\frac{i}{R} = \left(\frac{z_0}{2R}\right)^{0.8} \quad (2-3)$$

式中, R 为隧道半径(m)。

Attewell 等提出了式(2-4)与式(2-5):

$$\frac{i}{R} = k \left(\frac{z}{2R}\right)^n \quad (2-4)$$

$$\delta_{\max} = \frac{V}{\sqrt{2Ai}} \quad (2-5)$$

式中, z 为隧道开挖面中心深度(m); R 为隧道半径(m); k 、 n 为与土体性质和施工因素有关的系数(可查表); A 为隧道开挖断面面积(m^2); V 为沉降槽的断面面积(m^3); δ_{\max} 为隧道中心线的最大地面沉降(m)。

New 等考虑到分层土的影响, 提出式(2-6):

$$i = K_1 z_1 + K_2 z_2 + \dots + K_n z_n \quad (2-6)$$

式中, K_i 和 z_i 分别为第 i 种土的沉降槽宽度系数和厚度(m)。

Attewell 等提出了式(2-7)与式(2-8)^[11]:

$$i = 0.45z_i + 0.57 \pm 1.01 \text{ (固结影响小)} \quad (2-7)$$

$$i = 0.45z_i + 0.64 \pm 0.91 \text{ (固结影响大)} \quad (2-8)$$

Hurrell 提出了 $S_{\max, j}$ 的计算公式:

$$S_{\max, j} = 2S_{\max} \times \text{OFS} \times A$$

$$\text{初始超载系数 } \text{OFS} = \frac{r(z_0 - z) - \sigma_j}{S_u} \quad (2-9)$$

式中, r 为原状土容重(N/m^3); σ_j 为隧道内部支撑应力(kPa); z 为至隧道参考表面的深度(m)。

姚勇震综合施工因素(地层损失)提出了式(2-10)与式(2-11)^[12]:

$$S(x,t) = \frac{V_1 + HK_x t}{\sqrt{2\pi i}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right), \quad 0 = t = T \quad (2-10)$$

$$T = \frac{\sqrt{2\pi \bar{P}}}{EK_x} \quad (2-11)$$

式中, T 为超孔隙水压力完全消散所需的时间; K_x 为隧道顶围别土体加权平衡的渗透系数; \bar{P} 为隧道顶部超孔隙水压力的平均值; E 为土骨架平均压缩模量; H 为埋深(m)。

②地层损失 V_s 的确定。

地层损失 V_s :

$$V_s = V_1 \pi R^2 \quad (2-12)$$

一般情况下可以通过查表的方法确定相应的地层损失 V_s 。

在黏性土层中可根据稳定系数 N_t 来估计地层损失:

$$N_t = \frac{p_z - p_1}{S_u} \quad (2-13)$$

式中, p_z 为开挖面中心处土体垂直压力(kPa); p_1 为用气压或其他加压方法施加于开挖面的侧向压力(kPa); S_u 为不排水抗剪强度(kPa)。

Clough 等提出塑性黏土层中 N_t 和 V_1 的关系:

$$V_1 = 2V_0 S_u \frac{1 + \mu}{E_u} \exp(N_t - 1) \quad (2-14)$$

式中, V_1 为体积损失率(%); V_0 为理论排土体积(m^3); E_u 为土层弹性模量(kPa); μ 为土的泊松比。

Celestino 等通过对施工实测数据和数值模拟结果的分析, 指出当隧道掘进引起较大面积土体进入塑性区时, 横断面沉降槽不再是正态分布曲线形式, 而是类似塞子形, 得到了相应的屈服密度型曲线公式^[13]:

$$S(x) = \frac{S_{\max}}{1 + \left(\frac{|x|}{a}\right)^b} \quad (2-15)$$