

复杂地质条件下 地铁隧道穿越工程施工

关键技术



FUZA DIZHI TIAOJIANXIA

DITIE SUIDAO CHUANYUE GONGCHENG SHIGONG

GUANJIAN JISHU

郑爱元 武科 著

非外借



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

复杂地质条件下 地铁隧道穿越工程施工 关键技术

FUZA DIZHI TIAOJIANXIA
DITIE SUIDAO CHUANYUE GONGCHENG SHIGONG
GUANJIAN JISHU

郑爱元 武科 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书依托深圳地铁7号线建设工程,针对复杂地质条件下浅埋暗挖法隧道下穿既有工程,综合运用现场试验、理论分析与数值模拟,重点研究了复杂地质特征与灾害预报方法,揭示了浅埋暗挖隧道施工力学机理,提出了浅埋暗挖地铁隧道下穿既有建筑物高效施工技术;进一步,探讨了浅埋大跨度变截面隧道围岩失稳破坏机理与控制措施。总结形成了下穿工程对既有结构物安全控制的流程与风险控制体系提出完整的变形控制方法,从风险分析的角度对浅埋暗挖法隧道施工及组合工艺的应用技术进行评价,对今后类似工程的建设具有重要意义。

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、研发人员等参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

复杂地质条件下地铁隧道穿越工程施工关键技术 / 郑爱元, 武科著. —北京: 中国电力出版社, 2019. 8

ISBN 978-7-5198-3299-5

I. ①复… II. ①郑…②武… III. ①复杂地层—地铁隧道—隧道施工 IV. ①U231.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第118515号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 王晓蕾(010-63412610)

责任校对: 黄 蓓 朱丽芳

装帧设计: 赵姗姗

责任印制: 杨晓东

印 刷: 三河市航远印刷有限公司

版 次: 2019年8月第一版

印 次: 2019年8月北京第一次印刷

开 本: 787毫米×1092毫米 16开本

印 张: 12.5

字 数: 306千字

定 价: 68.00元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社营销中心负责退换

前 言

近年来我国地下轨道交通建设快速发展，由于交通规划的多变性以及城市的快速发展，前期城市轨道交通建设中没有预留新线的接线，或者预留工程的标准和条件不够，必然造成新建线路在既有线路附近施工的实际问题，产生了大量的新建地铁隧道下穿既有道路工程案例，其下穿施工技术难度大，新建隧道埋深浅，且地层沉降控制要求高，不确定因素多。若施工过程中对于既有建（构）筑物控制措施不合理，不但影响隧道内施工，对地面车辆行车安全也有较大范围的影响，因此受到国内外学者的广泛关注。

作为城市轨道交通建设的一种施工工法，浅埋暗挖法是在地表较近的地下进行各种类型地下洞室暗挖施工的一种方法。该工法具有拆迁少、不扰民、不破坏环境等特点，同时，结合工程特点和水文地质系统，创造了小导管超前支护技术、8字形网构钢拱架设计和制造技术、正台阶环形开挖留核心土施工技术和变位进行反分析计算的方法，突出时空效应对防塌的重要作用，提出在软弱地层快速施工的理念。然而，在实际工程建设中，对于结构埋置较浅、地面建筑物密集、交通运输繁忙、地下管线密集及对地面沉降要求严格等情况，采用浅埋暗挖法施工时，也应依据地质特征，不断完善和改进施工工艺，减小施工引起周围地层的移动，防止既有建（构）筑物的变位。

为此，本文作者依托深圳地铁7号线停车场出入线下穿北环大道快车道工程，采用理论计算方法、数值模拟方法、现场监测分析等技术手段相结合，对地铁隧道穿越既有市政道路的地层变形规律与控制方法进行研究，提出基于皮尔曲线模型的隧道施工地层变形三维时空预测模型，并将其拓展到地铁双线隧道；利用等效土柱法推导出地铁隧道下穿既有道路统一计算公式，并给出公式中相关参数确定方法；建立了三维数值模型，进行数值计算分析，研究了隧道下穿引起既有结构的应力应变状态；基于流固耦合模块对隧道开挖造成的孔压变化和渗流情况进行分析，研究了隧道间距对邻近隧道的影响关系；开展了超前加固措施进行比选，并对超前加固工艺进行进一步讨论。为工程稳定性及地层控制效果的评价提供理论依据，为同类工程提供参考和奠定理论基础。

由于作者水平所限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者提出宝贵的批评意见。

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 地质灾害超前预报方法	2
1.2.2 隧道工程施工力学机理研究	3
1.2.3 地层变形规律及预测方法研究现状分析	7
1.2.4 隧道下穿施工地层变形规律及控制措施研究现状	10
1.3 工程概况及难点	11
1.3.1 工程概况	11
1.3.2 工程难点	16
2 地铁隧道施工地层变形三维时空预测模型	17
2.1 隧道开挖引起地层变形的机理及时空效应	17
2.1.1 隧道开挖引起地层沉降机理	17
2.1.2 隧道开挖引起地层变形的时空效应	17
2.2 Peck 公式在预测地层变形中的应用	19
2.3 单线隧道施工地层变形三维时空过程统一计算	20
2.3.1 皮尔曲线模型	20
2.3.2 连续施工单线隧道地层沉降三维时空预测模型	22
2.3.3 考虑施工停顿的单线隧道地层沉降三维时空预测模型	22
2.4 双线隧道施工地层变形三维时空过程统一计算	23
2.4.1 连续施工双线隧道地层沉降三维时空预测模型	23
2.4.2 考虑施工停顿的双线隧道地层沉降三维时空预测模型	25
2.5 地铁隧道下穿既有道路施工地层变形三维时空过程统一计算	26
2.6 地层变形预测参数及其确定方法	27
2.6.1 地层损失率 V_{loss}	27
2.6.2 沉降槽宽度系数 i	28
2.6.3 前期沉降影响系数 a 和开挖速度系数 b	29
2.6.4 隧道半径和土质条件影响系数 n	29
3 复杂地质条件下地铁隧道穿越工程实测数据分析	30
3.1 隧道下穿广深高速公路工程	30
3.1.1 围岩变形特征	30
3.1.2 地表沉降规律	32
3.2 隧道下穿北环快车道工程	33

3.2.1	围岩变形规律	33
3.2.2	地表沉降规律	34
3.2.3	地层变形规律	35
3.3	隧道下穿地面厂房工程	38
3.4	隧道“零距离”下穿既有建筑物车站工程	45
3.4.1	监测项目	45
3.4.2	监测点布置	46
3.4.3	监测结果分析	48
4	复杂地质条件下地铁隧道穿越工程数值仿真分析	52
4.1	数值计算模型与分析方法	52
4.1.1	下穿广深高速隧道工程	52
4.1.2	下穿北环快车道隧道工程	54
4.1.3	下穿工业厂房隧道工程	57
4.1.4	“零距离”下穿既有运营车站工程	59
4.2	下穿既有建筑物数值计算结果分析	62
4.2.1	下穿广深高速公路隧道工程	62
4.2.2	下穿北环快车道隧道工程	70
4.2.3	下穿工业厂房隧道工程	83
4.2.4	下穿隧道地表振动特征分析	87
4.2.5	“零距离”下穿既有运营车站工程	90
5	复杂地质条件下地铁隧道穿越工程施工技术	102
5.1	地质灾害超前预报技术	102
5.1.1	隧道施工超前地质预报工作的重要性	102
5.1.2	地质雷达探测预报方法	103
5.1.3	超前钻探预报方法	103
5.2	隧道信息化监测技术	105
5.2.1	信息化监测目的	106
5.2.2	信息化监测内容	106
5.2.3	信息化监测断面和监测点布置	107
5.2.4	信息化监测频率	107
5.2.5	信息化监测预警、报警值	107
5.2.6	信息采集技术	108
5.2.7	信息处理技术	116
5.2.8	信息反馈技术	117
5.3	超前预加固施工技术	120
5.3.1	超前大管棚支护方法	121
5.3.2	超前小导管支护方法	129
5.4	动态化注浆加固施工技术	133
5.4.1	动态化注浆基本理念与方法	133

5.4.2	施工注意事项	134
5.5	控制爆破减震技术	135
5.5.1	影响隧道控制爆破效果的因素	135
5.5.2	隧道下穿既有建筑物爆破开挖基本技术方案	136
5.5.3	电子雷管爆破减震技术	141
5.6	隧道下穿段开挖工法转换技术	144
5.6.1	深农区间隧道下穿段开挖施工技术	144
5.6.2	皇福区间下穿福民车站施工技术	156
5.7	初期支护施工技术	164
5.7.1	安设钢拱架	164
5.7.2	挂设钢筋网	166
5.7.3	湿喷混凝土施工	166
6	复杂地质条件下地铁隧道穿越工程变形控制技术	168
6.1	基本控制技术	168
6.2	地表建筑物变形控制技术	169
6.2.1	桩基托换法	169
6.2.2	顶升法	169
6.2.3	迫降法	169
6.2.4	建筑物平移法	170
6.2.5	注浆加固保护法	170
6.3	施工变形及建筑物保护控制标准的确定	170
6.4	深农区间隧道下穿段变形控制技术	170
6.4.1	控制开挖进尺及步长间距	170
6.4.2	控制工序施工质量	171
6.4.3	洞内初期支护补强	171
6.4.4	初期支护背后注浆	171
6.4.5	洞顶地表处理	171
6.4.6	监控量测数据指导施工生产	172
6.4.7	公路路面防护	172
6.5	皇福区间下穿福民车站变形控制技术	172
6.5.1	针对4号线福民站的施工准备	172
6.5.2	减少底板沉降的保护	172
6.5.3	运营单位的配合	173
6.5.4	下穿段初期支护临时支护拆除方案及安全措施	173
7	施工安全与质量保障措施	176
7.1	安全生产目标	176
7.2	安全生产保证体系	176
7.3	安全管理措施	176
7.3.1	开工前准备工作	176

7.3.2	新工人进场时, 三级安全教育	177
7.3.3	班前安全技术交底	177
7.3.4	施工过程中的监督、检查、再教育及考核	177
7.3.5	班后总结及改进工作	177
7.4	安全措施	177
7.4.1	机械安全保证措施	177
7.4.2	安全用电措施	178
7.4.3	下穿段隧道施工安全保证措施	178
7.5	质量保证措施	180
7.5.1	质量目标	180
7.5.2	质量管理组织机构	180
7.5.3	隧道开挖质量保证措施	180
7.5.4	施工过程控制	181
7.6	应急预案	181
7.6.1	应急组织机构	181
7.6.2	应急物资	182
7.6.3	应急材料	183
7.6.4	洞内塌方应急预案	183
8	结论	185
	参考文献	187

1 绪 论

1.1 研究背景与意义

“十三五”期间，随着国民经济的持续快速发展和城镇化进程的加快，城市交通压力日益增大，为缓解大城市巨大的交通压力，地下轨道交通网的建设日趋密集。由于交通规划的多变性以及城市的快速发展，前期城市轨道交通建设中没有预留新线的接线，或者预留工程的标准和条件不够，必然造成新建线路在既有线路附近施工的实际问题，产生车站及区间隧道相互下穿的工程问题。所有这些问题直接关系到既有轨道交通的结构、线路安全，将影响既有线路的正常运营和在建工程的施工安全、工期和工程造价，对于我国城市轨道交通的快速建设和发展提出了严峻挑战，必须尽快解决。

作为城市轨道交通建设的一种施工工法，浅埋暗挖法是距离地表较近的地下进行各种类型地下洞室暗挖施工的一种方法。此方法继 1984 年王梦恕院士在军都山隧道黄土段试验成功的基础上，又于 1986 年在具有开拓性、风险性、复杂性的北京复兴门地铁折返线工程中得到应用，在拆迁少、不扰民、不破坏环境下获得成功。同时，结合中国水文地质特点，创造了小导管超前支护技术、8 字形网构钢拱架设计、制造技术、正台阶环形开挖留核心土施工技术和变位进行反分析计算的方法，提出了“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”18 字方案，突出了时空效应对防塌的重要作用，提出在软弱地层快速施工的理念。由此形成的浅埋暗挖法创立了适用于软弱地层的地下工程设计、施工方法。然而，在实际工程建设中，对于结构埋置较浅、地面建筑物密集、交通运输繁忙、地下管线密集，及对地面沉降要求严格等情况，采用浅埋暗挖法施工时，如果不严格按照 18 字方案实施，极易引起周围地层的移动。一方面在地表引起不均匀沉降，另一方面也会直接引起既有结构物的变位。

2012 年 5 月 31 日，中国电建股份公司（以下简称“中国电建”）接到深圳市地铁集团公司中标通知书——中标深圳市城市轨道交通 7 号线 BT 项目。这是中国电建承建的第一条完整的地铁项目和投资规模最大的城市基础设施项目。深圳地铁 7 号线像一条金元宝的弧线，从东到西把深圳最繁华、GDP 最高、人口最多的福田、罗湖、南山三个区串联起来，西起南山区西丽湖站，终至罗湖区太安站，全长 30.173km，中国电建以“投融资+设计施工总承包”的模式承建 BT 项目，合同金额 168.53 亿元，工程涵盖 28 座地下车站和 27 个区间土建、轨道、安装装修工程，以及新建体育北主变电所、深云车辆段及安托山停车场、深圳市轨道交通网络控制运营中心（NOCC）等工程。与此同时，深圳地铁 7 号线具有“地质博物馆”之称，近 1/2 面积是填海造地形成的，全线 21 个盾构区间，多次下穿楼房、河流、铁路、车站、高速公路、地铁隧道，沿线有 35 处重大风险源。因此，工程建设面临着七大难题：工程规模大、场地狭窄、施工难度大、环境复杂、危险源多、要求高、地质条件

复杂。

为此,依托深圳地铁7号线建设工程,针对复杂地质条件下浅埋暗挖法隧道下穿既有工程,综合运用现场试验、理论分析与数值模拟,重点研究了复杂地质特征与灾害预报方法,揭示了浅埋暗挖隧道施工力学机理,提出了浅埋暗挖地铁隧道下穿既有建筑物高效施工技术,进一步探讨了浅埋大跨度变截面隧道围岩失稳破坏机理与控制措施。总结形成了下穿工程对既有结构物安全控制的流程与风险控制体系提出完整的变形控制方法,从风险分析的角度对浅埋暗挖法隧道施工及组合工艺的应用技术进行评价,对今后类似工程的建设具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 地质灾害超前预报方法

目前,国内外隧道地质灾害超前预报方法主要有以下几种:直接预报法(水平钻孔法和超前导坑法)、地质分析法(断层参数预测法、地质体投射法和正洞地质编录与预报等)、物探法[TSP超前预报技术、地震负视速度法、水平声波剖面法(HSP)、TRT真地震反射成像技术、陆地声纳法、面波法、地质雷达技术、红外探水法、BEAM法]和地质物探综合分析法等。

隧道建设中地质灾害超前预报是保证岩溶隧道安全施工的重要环节,是国内外工程地质和隧道工程界十分关注而又没有得到很好解决的难题。隧道地质超前预报的研究由来已久,国内从20世纪50年代开始,先后采用超前导坑,水平超前钻探等方法进行超前地质预报。超前导坑掘进时,同样存在地质预报的问题,而且由于该方法造价高,在实际工程中除非有其他用途如运输、通风等,该方法在实际中很少采用。由于上述方法预报距离近、对隧道掘进施工干扰大,不能满足隧道快速、科学施工的需要。为了开发出预报距离远、施工干扰小、预报准确的科学预报方法,人们开始探索用物探方法开展隧道中地质预报的工作。20世纪80年代初,我国首先提出用物探方法对隧道进行超前地质预报,针对大瑶山隧道,铁道部攻关项目中列出了用物探方法进行超前地质预报的研究内容。20世纪80年代后期,在大秦铁路隧道施工过程中,研究用施工钻孔台车在掌子面钻15m深孔,探查前方不良地质情况。1992年,重庆煤炭研究所用自制探地雷达,在开滦煤矿井下巷道对工作面前方不良地质情况进行超前预报研究。1992—1993年,水电贵阳勘测设计院物探队用美国产地质雷达在锦屏二级电站5km勘探洞施工时,对不良地质进行超前预报工作。铁道部科学研究院铁建所经过对多种物探方法进行现场试验和生产使用,于1995年确定了以“地震反射负视速度法(隧道VSP)”和“陆地声纳法”为主,探地雷达和水平声波剖面法(HSP法,此法由中铁西南分院发明并不断完善)为辅的综合物探方法,对隧道前方不良地质缺陷进行超前预报,取得了较好的效果。

2000年后,铁道部科学研究院西南分院将水平声波法(HSP)进一步完善并研发了CT成像技术。国内也有不少学者提出采用地质方法预测隧道前方的地质缺陷,如刘志刚等提出用断层参数来推测预报不良地质体位置和规模的方法。秦小林和蒋忠信等提出一种地质、地貌调查与地质推理相结合的定性方法。张清依靠专家系统知识,建立了一个专家系统,以对

隧道下穿碳酸岩地区时对岩溶灾害进行预测。刘崧对岩溶勘察中常用的物探方法如电法、地震法、微重力法、射气法和地球物理测井法等岩溶勘察中的应用进行了介绍。近年来,山东大学等高等院校、其他科研院所和工程单位应用 TSP202 和 TSP203、地质雷达和陆地声纳等设备结合工程地质方法对国内秦岭隧道、圆梁山隧道、乌鞘岭隧道和龙潭隧道、八字岭隧道、庙坪隧道、宜万铁路沿线多处隧道进行了超前预报工作,其中不少隧道取得了较好的效果,但岩溶隧道的预报技术还有待提高。

国外方面,1984年,美国学者 Benson 等在北卡罗来州 Wilmington 西南部的一条军用铁路中运用地质雷达进行潜在岩溶危害的超前地质预报研究工作;1992年,瑞士 Amberg 公司推出用于隧道超前预报的 TSP 方法,近年又推出 TSP203;1995年,日本推出 HSP 技术。2000年,随着隧道反射地震波 CT 技术进一步发展,美国 NST 工程公司发展了 TRT 技术(真正反射层析成像)。TRT 法在结晶岩体中的探测距离可达 100~150m。该方法在奥地利的通过阿尔卑斯山的铁路双线隧洞施工中进行了全程的超前预报。

上述 TSP 等弹性波反射类方法可探查隧道掌子面前方地质缺陷(如断层、大的节理、裂隙、破碎带等),由于目前现场仅能测准第一层反射面的岩体波速 V_1 ,后面各层的波速 V_2 、 V_3 等的准确测量仍是需要突破的问题,因此该类方法对反射面空间准确定位比较困难。同时,由于所测到的反射波均与反射面垂直,空间定位时仅能将反射面沿产状延伸到隧道的正前方。因此,预报距离越远,误差越大,错误率越高。所以该类方法预报距离应尽量控制在 100m 以内。

地质雷达是应用电磁波的探测技术,根据电磁波双程走时的长短差别,确定探测目标的形态和属性,结合理论分析达到对前方目标的探测与判断。地质雷达主要用于对掌子面前方短距离(20~30m)的特殊地质问题(如破碎带、岩溶地区发育的溶洞、裂隙水等)进行预测预报,缺点是预报距离短,对工程施工干扰较大。

由于物探的多解性,单一预报方法对地质预报的准确度并不十分可靠,同时不同的方法对不同的地质缺陷预报效果也不尽相同。国内外专家、学者都在试图发展准确预报不良地质的三维可视化物探设备,但从目前状况看,还没有哪种设备能对各种地质缺陷做出准确预报。

因此,发展一种综合有效的方法,开展城市复杂地质灾害超前预报研究,对确保工程的顺利进行,无疑具有重要的现实意义。同时对其他类似工程也有相当大的指导意义和推动作用。

1.2.2 隧道工程施工力学机理研究

1. 地层移动与变形的时空效应

隧道施工引起地层移动与发展的规律和特征随隧道开挖工作面所处的位置、历经的时间、地层与隧道工作面的相对位置等的不同而变化,表现出强烈的时空效应,时间与空间的交互作用。

(1) 地层移动的时间效应

通过对隧道施工地表沉降进行实际观测,可得沿隧道纵向轴线所产生的地表变形的一般规律,如图 1.1 所示。地表点的变形经历三个阶段,即前期变形阶段、施工变形阶段和后续变形阶段。前期变形是指隧道开挖工作面尚未到达该点时的变形。它是由于工作面支护力不

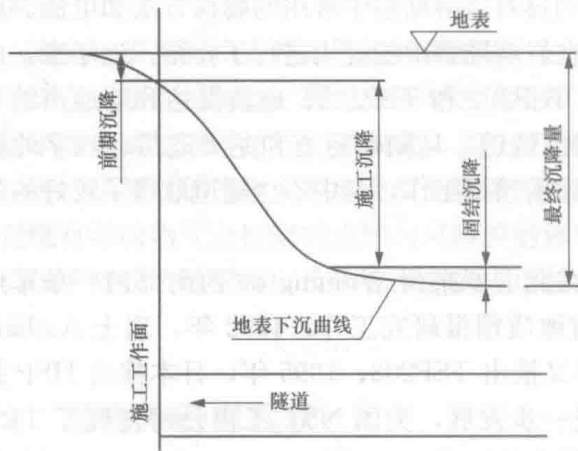


图 1.1 隧道开挖地表变形的一般规律

足等原因，导致工作面前方岩土体向后向下移动，在地表表现为微小下沉。在施工变形阶段，由于隧道开挖，隧道周边的岩土体必然向隧道内移动，一方面隧道开挖后不可能马上提供支护，另一方面支护也不可能完全阻止地层向隧道内的变形，在此阶段地表必然出现较大的下沉，这一阶段的下沉通常在 1 个月左右完成。在隧道开挖工作面通过后的很长一段时间内（有时需要几年以上时间），地表下沉仍在不断发展，这部分变形属于后续变形阶段，这主要是由于岩土体的次固结沉降和蠕变变形引起的。

隧道施工引起的地层变形从开始到最终稳定需要经历很长一段时间。在这个过程中，地层变形随隧道的开挖掘进不断发生变化，有时变形的性质（如拉伸变形和压缩变形等）还会发生改变。对于隧道周边的地表建筑物及地下管线而言，如果单从最终稳定的移动盆地看，所受到的变形均有可能在允许范围之内；但如果从隧道掘进的过程来看，建筑物及管线所受到的变形有可能超过其允许范围。

(2) 地层移动的空间效应

隧道施工所引起的地层移动在空间上具有三维性，它随着隧道工作面的推进沿隧道纵向不断向前发展，出现的地表沉陷槽也随之扩大和发展。地层的空间移动状况如图 1.2 和图 1.3 所示。

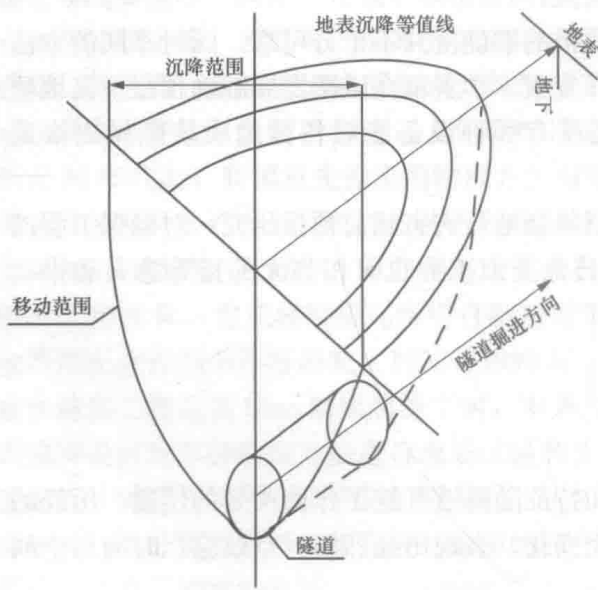


图 1.2 地层变形的空间形态

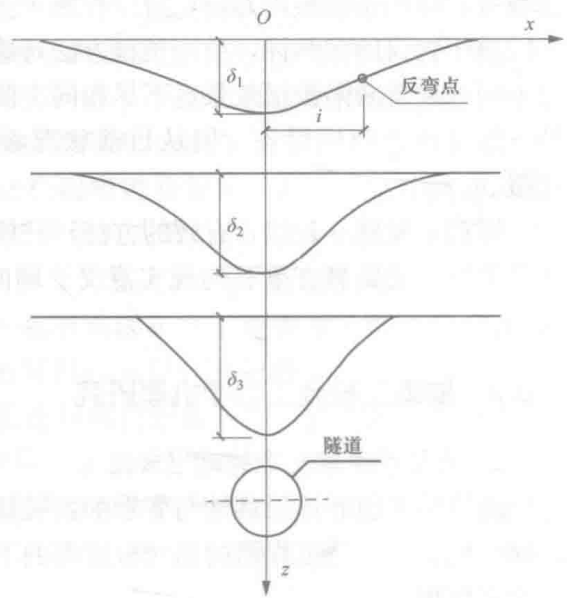


图 1.3 横向断面地层沉降形状

隧道开挖引起的地层空间移动具有如下规律：

- 1) 地层移动以隧道开挖工作面为起始点向上向前或侧向上扩展，其影响范围自隧道位置起从下到上逐渐增大，具有扩散性。

2) 竖向地层移动量的大小与距隧道工作面的距离有关, 在衬砌的拱顶, 下沉量最大, 随着与隧道工作面距离的加大, 下沉量逐渐减小, 具有衰减性。

3) 隧道施工引起的沉降槽在地表面上产生的沉降等高线呈锥形, 锥尖顺着隧道前进的方向。随着隧道工作面的向前延伸, 锥形沉降等高线向前扩展。

2. 地层移动与变形的理论基础

地球表层岩土体以及地表变形, 乃是亿万年地质构造运动作用的产物, 在隧道开挖施工之前, 它们处于平衡状态, 极为缓慢的大陆漂移及造山运动对工程的影响可以忽略不计。由隧道施工引起的地层移动与变形主要体现在以下几个方面:

(1) 地层损失理论

美国的 Peck 在对隧道施工引起的大量地表沉陷数据进行分析的基础上, 首先提出了地表沉降槽似正态分布以及地层损失的概念。他认为地层移动由地层损失引起, 并认为隧道施工引起的地表沉降是在不排水条件下发生的, 所以地表沉陷槽的体积应等于地层损失的体积。

地层损失是指隧道施工掘进过程中, 实际开挖土体体积与竣工隧道体积 (包括隧道周边包裹的压入浆体体积) 之差。隧道作为土体在弥补地层损失的过程中, 必然导致地层移动, 从而引起地表沉降。该法的理论基础是: 在隧道施工过程中产生了一定的地层损失, 相当于从地层中挖去一块岩土体, 形成一个空洞, 从而导致上部的岩土体产生移动和变形, 最终该空洞被填充, 而在地表则形成体积等于空洞体积的沉降槽。该理论在不排水固结的条件下, 对隧道施工期间的变形做出了较为满意的解释。

隧道开挖施工所引起的地层损失是多种因素作用的结果。隧道开挖卸载时, 开挖面岩土体会向隧道内移动, 隧道支护结构刚度偏低, 从而在围岩压力的作用下产生变形, 支护结构未及时闭合会造成围岩的挤入, 隧道支护结构背后存在一定的空隙, 如果隧道施工方法不当造成的围岩失稳以及隧道结构的整体下沉等都会产生地层损失, 并最终导致地层发生移动和变形。

(2) 孔隙水压力及固结压密理论

土体是由土颗粒 (固相)、气体 (气相) 和水 (液相) 所组成的三相体系, 土体介质的力学行为受土体颗粒间压力、孔隙水压力及气压力的控制。在含水地层中进行隧道施工时, 地层中的地下水位会产生变化: 当土体颗粒骨架之间的孔隙水逐渐被排出, 地层中的地下水位降低时, 会引起土体内部孔隙水压力的降低, 而土体颗粒间的应力, 即有效应力相应会增加。

假定地表下某深度处地层总应力为 σ , 有效应力为 σ' , 孔隙水压力为 p , 根据太沙基有效应力原理, 地下水位下降前应满足式 (1-1) 关系

$$\sigma = \sigma' + p \quad (1-1)$$

随着地下水位的下降, 孔隙水压力也随之减小, 在降水前后地层中的总应力应保持不变, 孔隙水压力的减少量 Δp 相应转化为粒间有效应力的增加量 Δp (如图 1.4 所示)。

$$\sigma = (\sigma' + \Delta p) + (p + \Delta p) \quad (1-2)$$

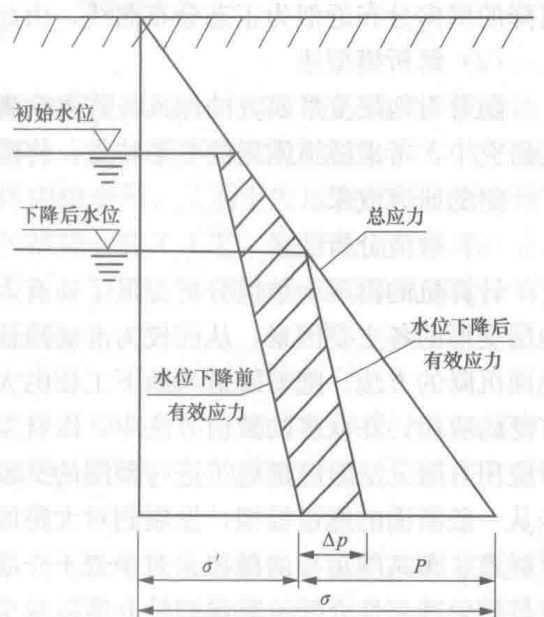


图 1.4 水位下降前后土中有效应力的变化

土层有效应力的增加相当于在降水地层上方施加了一种有效外荷载,在这种外荷载的作用下,地层相应会产生固结压密,降水范围内土体的固结压密向上传播并进行叠加,导致了地层的移动和变形,传递到地表,便形成了地表沉降槽。

(3) 次固结沉降理论

隧道开挖以及降水必然会对地层产生或大或小的扰动,在这种扰动作用后,土体骨架还会发生持续很长时间的压密变形,在土体蠕变过程中产生的沉降成为次固结沉降。在孔隙比和灵敏度较大的软塑和流塑性黏土中,次固结沉降往往要持续几年以上,且其所占总沉降的比例也较大;而在一般性地层中,次固结沉降所占比例较小。

3. 隧道施工地层变形预计方法研究

地层变形包括了地层下沉、水平位移以及由不均匀地层沉降和不均匀水平位移所形成的地层倾斜和水平变形,以及地层的弯曲变形。城市隧道施工引起的地层变形,尤其是在地面建筑设施密集城市中进行的隧道施工,一直是人们关心的课题。国内外科技工作者对地层变形的预计也提出了很多方法,主要包括建立在现场实测资料基础上的经验公式法、以理论分析为基础的解析模型法、以有限元计算为主要手段的数值分析方法、建立在模型试验基础上的物理模型法等。近年来,神经网络方法和随机介质方法也开始在隧道开挖地层变形预计中得到应用。

(1) 经验公式法

经验公式法主要是根据隧道开挖后地表沉降槽的形状,认为可以采用一定的曲线形式表示,再根据地表沉降实测结果或已有的资料,确定曲线的具体特征参数。在隧道施工引起的地层移动和变形中,地表沉降的大小和分布是最受关注的。美国的 Peck 较早对隧道施工引起的地面沉降问题进行了研究,在对大量隧道开挖地表沉降的实测数据分析的基础上,他于 1969 年系统地提出了地层损失的概念和估算隧道开挖地表下沉的实用方法,即著名的 Peck 公式。此后,Peck 本人及其他学者和工程技术人员做了大量工作,使之成为目前应用最为广泛的预计隧道施工地表沉降的方法。Peck 认为在不排水的情况下,地表沉降槽的体积应等于地层损失的体积,并假定地层损失在整个隧道长度上均匀分布,隧道施工所产生的地表沉降的横向分布近似为正态分布曲线,由此提出地表沉降横向分布的预计公式。

(2) 解析模型法

随着对地层变形研究的深入,许多学者将相关学科的研究成果引入到隧道开挖地层变形的研究中,考虑隧道围岩的变形特点,将围岩作为弹性、弹塑性、黏弹塑性体来看待,取得了一定的研究成果。

(3) 数值分析法

计算机的出现为数值分析提供了强有力的工具。借助于计算机,可以较全面地考虑影响地层变形的各主要因素,从而较为准确地预计隧道施工引起的地层变形,并提出有效地控制地面沉降的方法。随着隧道与地下工程的大量修建,数值分析方法在地下工程中已经得到了广泛的应用,在众多的数值方法中,以有限单元法的应用更为普及和成熟,国内外科技工作者应用有限元法对隧道施工进行预测的文献和报道很多。对于隧道结构的复杂程度而言,已经从一般断面的隧道模拟,发展到对大跨度隧道、小净距隧道、交叉隧道、连拱隧道、变跨度隧道、车站隧道等的模拟;对于岩土介质的复杂程度应用而言,已从对弹性介质的模拟,发展到对弹塑性介质、黏弹塑性介质以及节理裂隙等的模拟;就研究问题的应用领域而言,已经从单一的应力场问题的模拟,发展到对应力场、渗流场乃至温度场等多场耦合问题的模

拟；就解决问题的复杂程度而言，已经从平面问题的施工过程的模拟，发展到了对空间问题的动态施工过程进行模拟。

此外，将解析法与数值法相结合的半解析数值方法开始应用于隧道结构分析中。有限层法、有限条法、无限元法、边界元法等都属于半解析法。在此基础上，有限元与半解析元耦合分析的数值方法也开始出现，并在隧道中得到广泛应用。在隧道及地下工程分析中经常会遇到节理、层理以及断层面等不连续问题，为了能够处理非连续介质问题，发展了离散单元法和非连续变形分析法，它们均以受节理切割成分立离散的块体为研究对象。

(4) 模型试验法

在现场实测、理论分析的基础上，许多学者还通过模型试验方法对这一课题进行了研究。这些模型试验方法主要有相似材料模型试验和离心模型试验等，在这方面也取得了一定的研究成果。

(5) 神经网络与灰色预测方法

人工神经网络作为动态系统识别、建模和控制的一种新的工具，经过 20 年的研究取得了一定的进展，许多学者致力于将其引入自己的专业研究领域。对于隧道与地下工程领域神经网络的应用，不少学者也作了积极的探索，并取得了一些有意义的成果。

(6) 随机介质理论方法

随机介质理论是波兰学者李特威尼申 (Litwiniszyn) 于 1957 年研究采煤岩层与地表移动问题时提出的。他在砂箱模型试验研究的基础上，提出了五大公理，并应用严密的数学方法，建立了随机介质理论。在随机介质理论中，地表下沉预计参数是围岩物理力学性质和工程施工的各种影响因素的综合反映，其对地表下沉预计结果的精确度影响很大，预计参数的准确确定为工程的准确预报提供了可靠的保证。但是目前随机介质理论在浅埋隧道施工地层变形预计中的应用还只限于考虑平面情况，对变形的预计也仅限于地表和最终的结果，没有充分考虑变形的空间分布以及地层内部的位移和变形，也没有考虑变形随时间变化的过程，这些方面都有待进行进一步的研究和解决。

1.2.3 地层变形规律及预测方法研究现状分析

地层变形是下穿工程地表道路、构筑物等破坏的直接原因。目前常用的隧道开挖方法包括新奥法、盾构法、浅埋暗挖法等，但不管采用何种方法，都不可避免地破坏原有的平衡状态，引起围岩应力变化形成二次应力场，造成土体固结变形，从而引发地表沉降。影响地表沉降模式和沉降量的因素很多，如地质条件、支护措施、施工工艺、隧道截面形状等，合理地对比地表沉降进行预测可以有效指导施工，优化设计。目前，常用的地表沉降预测方法有经验公式法、理论解析法、模型试验法、数值预测法等。

1. 经验公式法

经验公式法是通过收集大量现场的实测数据，进行回归分析，通过数理统计总结其中的规律。这种方法比较简单，因为统计数据多取自现场，具有较好的参考价值，但往往考虑因素较少，使用上受到一定限制。

预测地表沉降最著名的经验公式是 Peck 公式，Peck 对大量现场地表沉陷实测数据进行归纳统计后认为，隧道开挖会在地表形成沉降槽，在假设土体不排水的情况下，沉降槽体积应等于土体损失体积。Peck 进一步提出，隧道上方地表横向沉降槽形状类似正态分布曲线，

且横向沉降曲线符合以下规律:

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (1-3)$$

$$S_{\max} = \frac{V_{\text{loss}}}{i \sqrt{2\pi}} \quad (1-4)$$

式中 $S(x)$ ——地表某点的沉降量;

x ——该点距离隧道轴线的水平距离;

V_{loss} ——土体损失量, m^3/m ;

i ——地面沉降槽宽度系数。

即隧道轴线距离沉降槽曲线反弯点的水平距离, 由经验公式求得:

$$i = R \left(\frac{h}{2R}\right)^n \quad (1-5)$$

式中 R ——隧道半径;

h ——隧道轴线距离地面埋深;

n ——0.8~1.0, 与土体性质有关。

在此基础上, 一批国内学者依据国内隧道修建现场实测数据对 Peck 公式进行了改进和研究: 韩焯等对国内收集到的多组监测数据进行了统计分析, 对 Peck 公式在国内隧道工程中的适用情况进行了讨论, 给出了公式中参数在国内各地区的取值。

马克栓对 Peck 公式在国内双线隧道开挖沉降槽预测中的适用性展开了论证, 并进一步提出用超几何方法对先行隧道沉降槽和后行隧道附加沉降槽进行叠加, 可以合理解决双线隧道开挖引起地表沉降槽的不对称性。

陈春来等对平行隧道盾构施工引起的三维土体沉降进行推导, 分析了两条隧道开挖面前后距离对沉降槽影响, 得到三维土层沉降预测公式。

方恩权等对大量实测数据进行回归分析, 在 Peck 公式的基础上, 综合插值法、最小二乘法, 推导出预测模型, 随后将模型融入信息系统进行地表沉降预测。

康庄等将盾构坡角和隆起效应等计入考量, 引入角度系数对 Peck 公式进行修正, 使其适应盾构隧道斜交下穿的地表沉降计算。

2. 理论解析法

(1) 弹-黏-塑性理论解析方法

随着相关力学理论的发展, 一些学者将弹-黏-塑性理论引入隧道软土地层变形研究中, 将隧道围岩看作弹性、弹塑性、黏弹塑性体进行解析计算来预测土体变形。久武胜保等将土体作为弹塑性和黏弹性材料, 同时把时间因素加入考量, 得到圆形隧道非线性弹塑性解析解。

卜跃威等将围岩的塑性应变软化特性引入到考虑应力释放的圆形隧道黏弹塑性解中, 并且在围岩的软化和残余强度阶段考虑围岩的塑性体积膨胀特性, 提出了考虑塑性软化以及塑性体积膨胀和围岩应力释放的圆形隧道弹塑性解。

上述采用的模型, 均把土体看做均匀、轴对称材料, 作为平面应变问题考虑, 因此其应用受到极大的限制。

(2) 随机介质理论

岩土体是一种饱含节理、裂隙断层等地质弱面的复杂介质, 目前的超前地质预报技术并

不能完全揭露隧道开挖区域围岩特性。目前的块体理论将围岩视为不同形状大小的块体,当隧道开挖时,地下岩土体出现临空面,力学平衡被打破必将引发块体的移动。大量块体的运动方向、运动距离具有不可预测性,但总体沉降往往呈现规律性。因此,概率统计的方法在这种情况下适用性较高。

波兰学者 J. Litwiniszyn (李特威尼申) 于 1956 年提出随机介质理论,把隧道开挖过程当作一个平面应变问题,运用概率统计的思想将隧道土体的开挖看作无数微小单元体开挖的总和。经过这样的处理后,对地面的影响也可视作每个单元体影响的叠加。

刘宝琛将随机介质理论引入国内,验证了该理论在国内煤矿中的适用性,随后将其拓展到隧道开挖等领域,并对随机介质理论进行系统的研究。张家生给出基本参数三维反分析的方法,并编制了相应的计算机软件(POBA)协助使用者确定公式中各项参数。施成华在刘宝琛给出的沉降槽体积与时间关系上对随机介质理论进行扩展,推导出地层变形时空过程统一计算公式。李立新将随机介质理论预测方法用于注浆抬升位移预测中,建立了单孔注浆抬升量模型,并运用叠加原理使其适用多孔注浆。魏纲基于单线随机介质理论建立修正了随机介质理论简化公式,并基于上述公式对双线水平平行盾构的计算公式进行推导,使其适应沉降曲线的不对称性。

3. 模型试验法

经验公式法和理论解析法都依赖计算公式,但公式中的参数毕竟有限,这就造成公式中考虑的影响因素数量与现场实际的差异,从而使某些因隧道开挖造成的影响无法被真实地反映。为了弥补这些问题,模型试验被引入地表沉降变形预测中。模型试验应用较多的是相似模型试验和离心模型试验。模型试验不同于计算公式,其往往能较为真实地反映现场情况和施工过程,结果直观,但其造价较高,结果往往受相似材料选取等因素的影响。

(1) 相似模型试验

相似模型试验根据尺寸比例分为足尺模型试验和缩尺模型试验。足尺模型试验采用与现场 1:1 的比例,一般采用原位试验,也有一部分采用室内试验,足尺试验是能够最真实地反应现场情况的试验方法,数据处理也较为方便,但因其尺寸往往过大,需要耗费大量的材料、人工,造价极其高,因此,大部分非必要的情况下,均采用缩尺模型试验。

李新志等基于长城岭隧道下穿古齐长城工程,通过缩尺地质力学模型试验,模拟现场开挖和支护情况,得到了地表沉降的量值和分布特征,并分析了施工措施对沉降规律的影响。

王非等利用填入长江砂的自制大型模型试验箱,模拟隧道施工引起的底层位移,分析不同深度地层位移模式,研究了砂性土隧道开挖引起地层沉降分布特征,得出同深度最大沉降量与深度呈线性关系;沉降槽体积不是常数,与深度有关;且沉降槽宽度系数与深度有关。

(2) 离心试验

缩尺模型试验往往不能解决重力问题,因此采用离心试验对重力模拟,试验中要用到离心机,通过调节转速来调节施加重力的强度,其优点是可以真实模拟现场重力,得到较为可靠的结果。

Kimura 和 Mair 等基于土体不可压缩假设,运用离心模型试验对伦敦地铁地层中产生的地表沉降进行预测,并给出水平位移的计算公式。Mair 和 Gunn 通过数值模拟并结合离心试验验证了隧道周围土层性状和隧道埋深对地表沉降的影响。Hirohisa-Kamata 通过离心试验方法,对砂性地层隧道开挖进行模拟,并着重对锚喷支护体系进行模拟,研究了垂直锚杆和掌子面锚杆对地层沉降的影响作用。