

地面沉陷灾害 预报与防治方法

李永树 著

DIMIAN CHENXIAN ZAIHAI
YUBAO YU FANGZHI FANGFA

中国铁道出版社

地面沉降灾害 预测与防治方法

王世军 著

中国地质大学出版社



0642 25
1.000

地面沉陷灾害预报与防治方法

李永树 著

中 国 铁 道 出 版 社

2001年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书从理论上解决了褶皱构造地层在任意形状地下空间开挖条件下地面沉陷灾害的预报问题,探讨了地面沉陷规律,推导出地面任意特征点在任意方向的五种移动变形值、地下开挖空间面积及体积、下沉盆地面积及体积等预报公式,以及预报参数的解算公式。讨论了铁路特征点移动与变形值的预报方法、铁路临界变形值的计算方法、开挖沉陷对铁路的破坏特征、铁路沉陷灾害的安全防护措施及其防灾减灾技术方案。在本书最后阐述了建立“全国铁路灾害防治信息系统”的方法及初步设计方案。

本书内容新颖、依据可靠、公式推导及论述严谨,具有较强的实用性,可供从事地面、铁路沉陷预报与灾害防治的技术人员、设计人员及科学研究人员参考使用,同时可作为有关专业高年级本科生和研究生的教学用书,亦可供铁路安全性预测、防灾减灾工程及其防护工程、管理信息系统、地下工程及矿区生态环境保护等方面的科技人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地面沉陷灾害预防与防治方法/李永树著. —北京:中国铁道出版社, 2001.4
ISBN 7-113-04151-5

I. 地… II. 李… III. 地面沉降—防治 IV. TB478

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 25599 号

书 名: 地面沉陷灾害预报与防治方法

作 者: 李永树

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑: 程东海

封面设计: 李艳阳

印 刷: 北京市燕山印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张: 11.75 字数: 292 千

版 本: 2001 年 7 月第 1 版 2001 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 1~1000 册

书 号: ISBN7-113-04151-5/TB·49

定 价: 28.00 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前 言

现行的地面沉陷预报方法都是建立在开挖平面构造（包括倾斜构造）地层的基础上，而平面构造地层仅是褶皱构造地层的一种简单特例。通常，在褶皱构造地层开挖条件下预报地面沉陷时，仍沿用平面构造地层开挖条件下的地面沉陷预报方法。这样，由于开挖平面构造地层与开挖褶皱构造地层时地层沉陷机理存在差异而导致地面沉陷规律不同，因此产生较大的地面沉陷预报偏差。

作者根据随机介质力学理论和数学分析方法，探讨了地面沉陷与开挖褶皱构造地层之间的内在关系，建立了三维空间单元开挖引起的地面单元下沉盆地和单元水平移动表达式，利用叠加原理推导出褶皱构造地层任意形状空间开挖条件下地面沉陷预报公式。特别对地下开挖空间形状的描述方法与处理技术、铁路沉陷灾害预报与铁路临界变形值，以及计算坐标的表示方法等方面进行了比较详细的讨论，提出了一些新方法，并总结了一些重要的地表移动与变形规律，在此奉献给读者。

本书出版得到西南交通大学出版基金大力支持。借本书出版机会，谨向对我从事研究工作提供多方面帮助的王金庄教授表示深深的谢意，同时，对在本书涉及的科研项目中做了大量工作的邢安仕、周竹军、陈勇、周雄、韩丽萍和张勇志等同志致以衷心的感谢。

由于作者学识有限，书中可能存在着不少缺点甚至错误，敬请读者批评指正。

李永树

2001年5月

目 录

1 地面沉陷概论	(1)
1.1 地面沉陷区环境问题	(1)
1.2 铁路特征点的移动与变形	(2)
1.3 铁路沉陷特征	(3)
1.4 现行地表沉陷预报方法	(5)
1.5 特殊地质与地下空间开挖条件下特征点沉陷预报	(7)
1.6 地面沉陷预报方法比较及发展方向	(8)
1.7 本书研究内容及特点	(9)
2 地面沉陷机理及其预报公式	(13)
2.1 地面沉陷机理	(13)
2.2 地面移动与变形的理论模型	(14)
2.3 三维空间开挖时特征点移动与变形预报	(16)
2.4 几种特殊情况	(20)
2.5 铁路特征点移动与变形预报公式	(23)
3 预报参数与沉陷空间计算方法	(26)
3.1 形状系数	(26)
3.2 u 、 v 、 k 及 L_s 算法	(30)
3.3 定积分的数值解法	(32)
3.4 地层开挖面积与开挖空间	(35)
3.5 铁路沉陷范围与临界变形区面积	(35)
3.6 地表沉陷空间计算方法	(38)
4 铁路临界变形值与软件系统设计	(40)
4.1 铁路临界变形值确定方法	(40)
4.2 地表沉陷区铁路安全性预测	(42)
4.3 铁路移动与变形预报程序主控流程	(44)
4.4 计算形状系数及预报参数	(45)
4.5 开挖空间积分区间与计算坐标	(47)
5 计算机模拟研究及软件系统检验	(54)
5.1 软件系统检验特定方法	(54)
5.2 软件系统测试过程	(55)
5.3 软件测试用例设计	(55)
5.4 测试结果对比与分析	(57)
5.5 地表移动观测站实测资料验证与分析	(77)
6 铁路沉陷预报系统	(83)

6.1	系统主要功能	(83)
6.2	褶皱构造地层开挖时铁路特征点移动与变形预报	(84)
6.3	平面构造地层开挖时特征点移动与变形预报	(91)
6.4	多层层状空间开挖时铁路特征点移动与变形预报	(92)
6.5	计算铁路沉陷预报系统的预报参数	(93)
6.6	开挖沉陷地区面积及体积计算	(94)
6.7	地层开挖面积及开挖空间体积计算	(95)
7	铁路沉陷防治技术	(96)
7.1	铁路沉陷防治措施	(96)
7.2	铁路坍塌分析及整治实例	(98)
7.3	铁路路基沉陷预报方法及防治	(99)
7.4	地表沉陷对桥梁的破坏影响	(103)
7.5	隧道沉陷预报及治理方法	(106)
7.6	留设保安矿柱的方法	(110)
8	地表移动盆地特征与形态分析	(113)
8.1	单斜构造地层开挖时地表移动规律	(113)
8.2	地面移动与变形曲线形态分析	(115)
8.3	相似材料模拟实验研究	(120)
8.4	下沉盆地形态分析	(124)
8.5	开挖沉陷地区下沉系数分析	(126)
9	全国铁路灾害防治信息系统设计方案	(130)
9.1	地理信息系统技术的先进性	(130)
9.2	全国铁路灾害防治信息系统选型及启动方案	(133)
9.3	全国铁路灾害防治信息系统总体构想	(143)
9.4	铁路空间数据分类、编码方案及相关标准	(148)
9.5	全国铁路灾害防治信息系统设计方案	(152)
9.6	全国铁路灾害防治信息系统组成	(159)
10	主要结论	(169)
	附录 本书摘要	(174)
	参考文献	(180)

1 地面沉陷概论

1.1 地面沉陷区环境问题

地下开挖是指开发地下各种矿产资源和进行地下挖掘工程等项活动。地下开挖空间的形成主要是由以下因素造成:地下工程施工、开发地下矿产资源、地下水流失或过量抽取、地层液化、岩溶塌陷(包括陷落柱和淤泥带地区)、老窑或古井及地下隐蔽工程等。随着矿产资源的持续超量开发,大部分老矿区的资源已接近枯竭,而国家经济建设和人民生活水平的提高急需更多的资源,因此,导致地下资源开发活动不可避免地延伸到了建筑物下、铁路下和水体下(即“三下”)的地层中。并且,当代及将来交通线路立体化的发展、国防建设及其它经济建设的需要,在“三下”的地下开挖工程也将会更加广泛地开展起来。此外,还存在数量众多的集体和私营小矿正在“三下”进行无证开挖或越界乱掘乱采。开发地下矿藏(包括金属矿、非金属矿、煤炭、地下水等)、地下工程施工或地下水流失等因素都会引起地面沉陷(即开挖沉陷),导致地表发生下沉、倾斜变形、曲率变形、水平移动、水平变形及非连续变形等,对位于地面的各种建筑物、铁路及水体产生破坏影响,严重威胁人民的生命及财产安全。近年来,由于“三下”开挖活动造成的地表沉陷已经成为地面沉陷地区最主要的环境问题和社会问题,房屋受损、建筑设施塌陷及水体流失等严重事故时有发生,由此产生的矛盾与纠纷日益尖锐复杂,法律纠纷事件不断出现,愈来愈严重地干扰了人们正常生活和生产活动,制约了当地经济的发展。另外,随着“三下”开挖工程的广泛深入开展,地质与地下开挖条件越来越复杂,同时对地面保护对象的保护标准也越来越高,因此,要求对地表特征点的沉陷预报精度越来越高。特别在我国的主要矿区和部分乡镇及个体小矿,正面临着开发矿产资源与保护生态环境之间的尖锐矛盾^[1]。

由于在地下形成了开挖空间,破坏了原有地下岩体的应力平衡状态,因此,引起从开挖地层开始自下而上的覆岩内部依次发生冒落、断裂、裂隙、弯曲等岩层移动过程,最后在地表出现下沉盆地,使得地面生态环境系统遭受严重破坏影响,同时,危及人民的生命和财产及地下作业人员自身的安全。这种由于地面沉陷给地表生态环境系统带来的灾难影响普遍存在,并且,主要表现在以下方面:

(1) 地面出现下沉盆地,地表产生裂缝、倾斜和弯曲等变形,使原有地形发生改变,在地下潜水位高地区可能出现地面积水或大面积被水淹没;

(2) 在特殊地质与地下空间开挖条件下,地表出现阶梯状塌陷坑或塌陷漏斗,甚至发生突然坍塌,在山区还可能引起山体滑坡等地质灾害;

(3) 各种建筑物(包括城乡民宅、机关学校、商店及工矿厂房等)产生裂缝、倾斜,甚至倒塌,或者由于地表沉陷而使建筑区出现大范围积水;

(4) 铁路、公路、地面管道及地下所埋的各种管线(包括自来水管、煤气管、电缆等)产生偏斜扭曲、坡度变化,甚至被拉裂或折断;

(5) 地表河流、湖泊、水库、工业和民用水井及地下含水层等各种水体产生导水裂隙,引起水资源大量渗漏,还可能出现全部流失现象;

(6) 土壤生态系统遭受严重侵蚀, 有用矿物质、养分和水汽漏失或挥发, 绿色植被生长环境被破坏, 甚至引起肥沃土壤沙漠化、盐渍化或沼泽化;

(7) 地表水、地下水、老窑水及开挖地层上覆岩层中的流砂砾石等沿着开挖活动产生的连通裂缝溃入地下开挖空间, 严重威胁地下作业人员生命及国家财产的安全;

(8) 破坏了开挖地层上覆岩层中的有用矿床, 造成地下水系紊乱或被污染, 甚至使得更珍贵的矿产资源失去开发价值, 影响了矿产资源的合理开发和综合利用;

(9) 地下水的过量抽取导致地表潜水位下降, 在城市下面形成缺水漏斗, 造成地面建筑物、构筑物下沉、倾斜和开裂, 在沿海城市甚至出现海水倒灌。

特别是随着矿产资源的大量开发, 开挖沉降带来的环境问题和社会问题越来越尖锐。尤其在一些老矿区, 面临的“三下”开挖形式更加严峻, 留设的各种大量保护矿柱开发与否不仅涉及到稳定生产规模、高昂的迁村费用、企业后劲不足和生产接替, 而且关系到生产企业经济效益、人员安排和工农关系等方面的诸多问题。况且, 我国的四化建设还持续地需要更多的矿产资源。如果生产矿井提前报废或浪费大量的保护地面建筑设施的矿柱资源, 这将会给国家利益带来重大损失。因此, 地表沉降预防及治理工作意义重大, 具有显著的经济效益、社会效益及环境效益, 应保证技术和资金的投入, 采用最优化的地下开挖方案及地面防护措施, 做到既能够高效、合理地开发矿产资源, 又能够可靠地保护人民的生命财产和土地资源, 避免农民与地下开挖企业之间的矛盾激化, 促进地表沉降地区的经济发展和社会稳定。

为了合理、安全地进行地下空间开挖工程和开发矿产资源, 保护地面各种建(构)筑物和生态系统的动态平衡状态, 必须准确地预报地下开挖导致地表受到的破坏影响范围和程度, 即在地下工程开挖之前根据当地地质及地下空间开挖条件, 利用地表移动理论事先预报特征点受到的开挖破坏影响, 包括任意位置特征点沿任意方向的下沉、倾斜变形、曲率变形、水平移动、水平变形等值及非连续变形情况。这样, 就能够在地下工程开挖之前或开挖过程中, 定量地预测出地面任意位置将受到的开挖破坏影响程度, 并且与建筑设施的临界变形值进行对比, 分析建筑设施将受到的开挖破坏等级, 例如, 判断出建筑设施是否开裂、倾斜或倒塌等破坏后果, 以便于设计和采用最佳防护措施, 包括特殊的地下开挖技术及地面预防和保护措施, 最终达到减小或消除地下开挖对建筑设施的破坏影响。

1.2 铁路特征点的移动与变形

铁路特征点主要是指位于下列位置的具有特殊意义的点: 钢轨轨面, 路基与地面交线处及路肩边缘, 线路中心线, 涵洞, 线路方向变化和坡度变化处, 地面下沉盆地最大下沉点、拐点、边界点及临界变形点, 隧道两端的峒门、内外岩壁、顶壁, 桥梁的桥台、桥墩、跨梁, 附属建筑设施角点、结合处、中点位置, 高路堤、陡坡路堤、深路堑、悬崖峭壁、陡坎深沟及地层易滑移处, 地层或断层在地面的露头, 地质构造和地形的特征点等^[2]。

特征点下沉: 在地表沉降区, 特征点的移动具有极其复杂的时间和空间过程, 运动轨迹取决于众多因素, 但是, 起主导作用的因素是特征点与地下开挖空间的相互位置关系。通常, 特征点在沉降全过程中的移动向量, 从其起、止相对位置来看是指向地面下沉盆地中央方向, 并且, 特征点的移动状态可以用垂直移动分量和水平移动分量来描述。特征点的下沉就是其垂直移动分量, 水平移动就是其水平移动分量。因此, 特征点的下沉表达式为

$$W_i = H_n^i - H_0^i$$

式中, W_i 为第 i 个特征点的下沉值, H_n^i 和 H_0^i 为第 i 个特征点在下沉以后和下沉以前的高程值。当 W_i 为负值时, 表示特征点 i 下沉; 而当 W_i 为正值时表示特征点 i 上升。

特征点倾斜变形: 在地表沉陷区, 由于相邻两特征点的下沉值不同, 则会使两点之间的地面产生倾斜。因此, 倾斜变形是指相邻两特征点间曲线中点切线的斜率, 即特征点间地面的平均坡度, 表达式为

$$I_{i-j} = \frac{W_j - W_i}{L_{i-j}}$$

式中, I_{i-j} 为两特征点 i 、 j 之间的倾斜变形, W_j 和 W_i 分别表示特征点 j 和 i 的下沉值, L_{i-j} 为特征点 i 、 j 两点之间的水平距离。当 I_{i-j} 为正时, 表示由特征点 i 至特征点 j 方向为地面下沉值减小的方向, 而当 I_{i-j} 为负时, 表示由 i 至 j 方向为地面下沉值增大的方向。

特征点曲率变形: 设三个特征点 i 、 j 和 k , I_{i-j} 为特征点 i 、 j 两点之间的倾斜变形, I_{j-k} 为特征点 j 、 k 两点之间的倾斜变形。由于 I_{i-j} 、 I_{j-k} 值不同, 则在两段特征点之间的地表产生倾斜变形差, 如果再除以两线段中点之间的水平距离, 则得到平均倾斜变形的变化值, 即特征点的曲率变形表达式为

$$K_{i-j-k} = \frac{2(I_{j-k} - I_{i-j})}{L_{i-j} + L_{j-k}}$$

式中, L_{i-j} 和 L_{j-k} 分别为特征点 i 、 j 两点之间和特征点 j 、 k 两点之间的水平距离。当 K_{i-j-k} 为正时, 表示地表呈凸形变形, 而当 K_{i-j-k} 为负时, 则表示地表呈凹形变形。

特征点水平移动: 特征点 i 的水平移动表达式为

$$U_i = L_n^i - L_0^i$$

式中, U_i 为第 i 个特征点的水平移动值, L_n^i 和 L_0^i 分别表示特征点 i 在水平移动之后和水平移动之前时 i 点至观测线控制点之间的水平距离值。

特征点水平变形: 由于两相邻特征点的水平移动值不同, 引起地表发生水平变形。特征点之间的水平变形是指两相邻特征点之间单位长度的拉伸变形与压缩变形。设 i 、 j 为两相邻特征点, U_i 、 U_j 分别为特征点 i 、 j 的水平移动量, 则水平变形表达式为

$$E_{i-j} = \frac{U_j - U_i}{L_{i-j}}$$

式中, L_{i-j} 为特征点 i 、 j 之间的水平距离。当 E_{i-j} 为正时, 表示拉伸变形; 当 E_{i-j} 为负时, 表示压缩变形。

1.3 铁路沉陷特征

由于国民经济需要更多的矿产资源 (包括地下水), 以及采矿企业的生存和发展, 导致铁路 (包括铁路线路、车站、桥梁、隧道、信号系统及附属建筑设施等) 下面资源开发活动逐渐广泛地开展起来, 特别是存在着数量众多的地方小矿在铁路沿线进行无证开挖或越界开挖。这些地下开挖活动引起地表沉陷, 破坏了铁路线路及其附属设施的稳定状态, 对列车的安全运输构成了严重威胁, 已经造成列车减速行驶、停运或被迫改线等事故, 并且还存在着大量的脱轨或翻车事故隐患。例如, 由于受铁路下小铁矿开挖破坏影响, 在邯长线 74 km 处路基发生突然坍塌, 形成一个长 15 m、宽 10 m、深 15 m 的塌陷坑, 钢轨处于悬空状态, 幸被及时发现而未造成灾害事故。如何在地下开挖之前和已经存在开挖空间的情况下, 评估

铁路将受到的损害程度,并且防止灾害事故的发生,目前正在引起有关部门的极大关注,同时也是岩层与地表移动领域亟待解决的难题。国内外情况均属如此^[3]。

地表沉陷对铁路的破坏影响主要有以下表现形式:铁路路基松动、下沉、倾斜、隆起、开裂、断裂,甚至坍塌;铁路线路水平方向横向移动和竖直方向发生纵向移动,导致线路走向、坡度、竖曲线曲率、两条钢轨轨面高度发生变化;轨缝改变,鱼尾板拉断,涨轨,在山区路基沿层面发生局部或整体滑移等。地表移动与变形对铁路产生破坏影响的主要特征表现在以下方面。

由于地表下沉导致铁路路基下沉,当路基在起垫加高的过程中形成高路堤时,引起边坡坡度变化,可能造成路堤边坡的最大高度超限。当路基下沉量大于潜水位至地表的高度时,部分路堤则沉入水位以下,路堤两旁积水。地表水平变形的影响使路基受到拉伸和压缩作用,因而路基会产生裂缝或断裂,特别是对稳定性较差的高路堤、陡坡路堤和深路堑破坏影响更大,甚至在特殊地质与地下空间开挖条件处路基出现滑坡或坍塌。另外,路基受到地表沉陷影响后出现松动、隆起或开裂,容易遭受雨水侵蚀。

道床下沉引起钢轨在竖直面内发生挠曲。地表不均匀下沉引起线路倾斜,从而改变线路坡度,使线路单位质量的坡度阻力发生变化。线路纵剖面上坡度变更点处均设有竖曲线,地表曲率变形将使线路竖曲线的形状发生变化,地表正曲率变形使线路原凸竖曲线的半径变小,负曲率变形使线路原凹竖曲线的半径变小,这种竖曲线半径减小和长坡道变成竖曲线,非常不利于线路的安全性。垂直于线路方向的地表倾斜变形,使直线段的两股钢轨不在同一水平面上,引起曲线线路的超高度增大或减小,如果这些偏差超过允许值或在曲线头出现反超高现象时则可能导致列车行车事故。垂直于线路方向的地表水平移动将使线路方向变化,曲线段线路将改变原来曲线弯曲的圆顺程度,使曲线正矢发生变化。地表沉陷导致轨枕歪斜、扣件松动,因而两根钢轨的轨距受到地表横向拉伸变形影响而有所改变。沿线路方向的地表水平移动不均匀性使线路发生相应的纵向水平变形,在地表拉伸变形区线路轨缝增大,在地表压缩变形区线路轨缝减小,当轨缝超过构造允许最大值或瞎缝时,在拉伸区可能将鱼尾板拉断,而在压缩区使接头产生较大压应力造成涨轨。

地表倾斜变形使得桥梁墩台发生相应倾斜,重心和荷载的偏移使墩台的强度和稳定性受到损害。当墩台发生的纵、横向倾斜不一致时,桥跨结构将在对角位置的支座上出现悬持现象,这时桥跨结构受到横向扭力的作用,使金属桥跨结构横向连系的杆件作用失调,使钢筋混凝土桥跨结构的连接横梁上产生裂缝。在地表曲率变形的影响下,墩台地基将发生弯曲变形,使地基反力重新分布。地表水平变形使得地基土壤相对墩台基础发生移动,导致墩台受到地基土壤的摩擦力、挟持力和土压力等附加作用力。在地表压缩变形区和负曲率变形区,墩台向桥梁跨间方向移动;在地表拉伸变形和正曲率变形区,墩台向桥梁跨外方向移动;当简支结构的桥跨在活动端支座没有活动间隙时,桥跨结构将像横撑那样阻止墩台的移动,从而造成破坏影响。在地表拉伸变形作用下,涵洞的密封性将受到破坏,涵洞里的水会透过缝隙渗入路基土体,增加了土体的含水量,同时也可能冲走部分土体,从而在路基里形成空洞。地表沉陷导致涵洞基础发生位移,在拱顶或拱座截面上出现裂缝,甚至在变形值较大时发生拱的突然坍塌。地表沿通讯和信集闭线路方向发生水平变形时,地下电缆亦同时发生纵向变形,架空线路支柱之间的距离也将发生变化,在地表移动剧烈地区支柱可能倒塌,当气温和附加张力在导线上产生较大的荷载时,导线可能被拉断。同样,地表沉陷将对车站的建筑物造成严重破坏影响。

1.4 现行地表沉降预报方法

近二百年来,岩层与地表移动研究人员经过长期不懈的努力实践,利用多种研究手段对地表沉降机理及其岩层与地表移动规律进行了深入研究,建立了多种多样的开挖空间上覆岩层直至地表的沉降模型,形成了各具特色的特征点移动与变形预报理论和方法^[4]。根据系统论的观点和控制论过程辨识技术,可以认为建立地表沉降模型有三种基本方法:机理分析法(即理论建模或“白箱”问题),它是通过分析过程的运动规律,运用一些已知的定律、定理和原理来建立数学模型;测试法(即辨识建模或“黑箱”问题),它是通过测量过程的输入输出数据,利用这些数据表现出的过程特征来建立数学模型,常用的方法有最小二乘法、梯度校正法和极大似然法;综合法(即“灰箱”问题),它是把理论建模和辨识建模两种方法结合起来使用,机理已知的部分采用理论建模的方法,机理未知的部分采用辨识建模的方法。地表沉降模型的表现形式有:数学模型,它用数学结构的形式来反映实际过程的特征;图表模型(非参数模型),它用图形或表格的形式来表现过程的特征;直觉模型,它是指过程的特征非解析的形式直接存储在人脑中,靠人的直觉进行控制和判断,例如,凭经验估计;物理模型,它是根据相似原理把实际过程缩小复制,或是实际过程的一种物理模拟。建立了具体的地表沉降模型后,便可以进行特征点沉降预报工作。

1.4.1 经验公式法

在对地表移动观测站实测资料进行综合分析的基础上建立起经验公式,然后,把这些预报关系式应用于类似地质与地下空间开挖条件下的地表沉降地区。通常,利用经验公式预报与建立经验公式很相近地质与地下空间开挖条件下的特征点移动与变形具有非常高的精度,下沉预报值的偏差可以控制在10%以内,而其它变形值的预报偏差可以限制在30%左右。在一些主要矿区都采集了有关地表移动资料,并且,积累了大量地表沉降预报经验,因此,经验公式法具有广泛的应用基础,而且容易提供出与其它预报方法的预报结果进行比较的基本数据。经验公式的导出需要大量的野外观测站实测资料和地质与地下空间开挖条件,但是,预报公式形式通常很简单。

示例:英国在《下沉工程师手册》中利用地表移动实测资料建立了经验公式(适用于水平或缓倾斜开挖地层),主要关系式有

特征点的最大下沉值: $W = M \cdot f(D/H)$

特征点最大倾斜变形值: $I = f(W/H)$

特征点最大水平变形值: $E = f'(W/H)$

式中, M 为开挖地层厚度, D 为地下空间开挖宽度, H 为开挖地层埋藏深度, f 为函数, f' 为 f 对变量 W/H 的导数。

1.4.2 剖面函数法

根据地下开挖空间形状,剖面函数法利用公式或数表预报下沉盆地指定剖面的特征点移动与变形值,通常,指定的剖面是沿地下开挖地层走向或倾向断面。定义下沉盆地剖面函数为图表或数学表达式是以实际经验为基础,剖面函数公式或诺谟图中常数都是根据当地实测资料求取,并且,这种预报方法的复杂程度取决于所考虑影响因素的多少,最简单的情况是

仅考虑开挖地层埋藏深度的影响,而精确的预报方法应当考虑其它有关的地质与地下空间开挖条件。剖面函数法的优点为使用方便且直观,利用数学式子便于进行数学分析和使用计算机解算,并且,利用较少的实测资料就可以确定预报公式中的参数值。而剖面函数法的缺点是剖面函数不一定符合实际下沉盆地形状,特别是预报特征点变形值时可能出现较大的偏差,并且,下沉盆地形状还可能取决于在剖面函数中未考虑到的一些地质与地下空间开挖条件的影响,另外,该法较适用于矩形地下空间开挖条件。我国常见的负指数函数法、双曲函数法、典型曲线法及威布尔法等都属于剖面函数法情况。

示例:由 Brauner 和 Kratzsch (1983 年) 给出了最具有代表性的剖面函数,如图 1.1 所示。图 1.1 中,下沉函数基本关系式为 $W(X) = f(W_0, X, r)$, S 为拐点偏距, r 为主要影响半径。

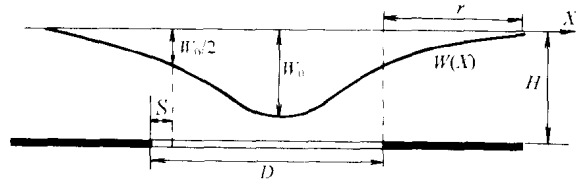


图 1.1 下沉剖面函数示意图

1.4.3 影响函数法

利用影响函数预报特征点移动与变形的理论根据为:在能够对特征点产生开挖沉陷影响的地下岩层进行单元开挖后,则在该点处形成一个单元下沉盆地,因此,该点的总移动与变形值应在开挖沉陷影响范围内的所有单元地层开挖后对该点的开挖沉陷影响叠加值。根据实践经验建立的影响函数可以存在着若干个任意常数,也可以包含着岩石力学参数。影响函数通常显示出特征点周围受到开挖沉陷影响的环状区域,并且,利用方程式建立每个区域的开挖影响百分比与该点沉陷之间的关系式。开挖沉陷影响范围通常是圆形的,偶尔为了计算方便也假定为六边形。影响函数法的主要优点在于它能够预报任意形状地下空间开挖条件下的任意特征点沉陷量。

示例:微元开挖在地表形成微元下沉盆地,那么,特征点 P 的总下沉量等于整个地下开挖空间所有单元开挖对 P 点下沉影响的叠加值。因此,当地层开挖面积为 A 时, P 点的下沉量为

$$W = \iint_A f(x) dA$$

式中, $f(x)$ 为微小面积 dA 开挖后对 P 点的下沉影响函数, x 为 dA 与 P 点之间的水平距离。影响函数构成了开挖沉陷的预报基础,而由适当影响函数确定的积分格网法是最常见的图解方法。

1.4.4 解析模型法

当认为开挖沉陷问题可以利用某些数理定律解决时,则可以建立开挖沉陷数理模型,前些年利用弹性理论解决地表移动问题受到了广泛注意,并且,在一些地区取得了成功。根据岩体的弹性特征建立确定开挖沉陷问题的方程组,这些方程组通常表示了平面问题的几何条件,并且已能够获得其解。根据事先采集的实际资料通过逆向分析获得开挖空间岩层的特征参数。有限元法是一种非常有效率的数学模型,但是,岩体特征参数的选择比较困难,由于导致地表移动的各项同性弹性解通常不符合实际情况,这样,由数学方法导出的下沉盆地通

常比实际下沉盆地更平缓。利用非线性分析方法模拟岩石断裂和地表移动提供了利用数学方法预报开挖沉陷更实用的算法,这种建模和解算的方法可以预报任意地层的岩层与地表移动,同时,也允许在模型中出现一些地质与地下空间开挖条件及岩石力学参数。

示例:由 J. Litwiniszyn 提出的随机介质模型是最普遍使用的方法之一,理论模型采用正态分布密度函数

$$f(x) = \frac{W_0}{r^2} e^{-\pi \left(\frac{x}{r}\right)^2}$$

由 King 和 Whetton 提出的岩体移动弹性分析法、Berry 提出的各项同性岩层二维分析法、Berry 和 Sales 提出的横向各项同性岩层弹性分析法都是根据弹性理论建立开挖沉陷模型,利用这种方法预报开挖沉陷问题的制约因素是地下空间上覆岩层缺乏均质性,即使已知每一岩层的弹性特征,仍然很难确定横向界面上应力和位移分量,解决这个问题的方法是利用有限元方法,通过选定某些单元的弹性参数,就可以根据层状模型获得适当的弹性参数。由 Marshall、Berry 和 Astin 提出的岩层移动粘-弹分析法,这种方法的限制条件是缺少适用于某些地层流变力学方面的参数。由 Cherry 提出的岩层移动塑性分析法,由于对这种模型的重视不够,限制了它在呈现塑性变形特征的浅开挖深度情况下应用,这里通常存在着坚硬粘土层、粉砂层或松散层,并且属于富含水地层,塑性模型很少被采用的原因也是由于很难确定地下开挖空间上覆岩层的特性参数。

1.4.5 物理模型法

在世界上大多数国家,为了达到观测开挖沉陷过程的目的,使用小比例尺相似材料模拟实验方法表现地下空间开挖过程中岩层与地表移动特征,并且,都获得了程度不同的成功。制作物理模型的材料多种多样,但是,最获成功的材料是沙、明胶和弱粘结状态的熟石膏。由这类材料制作的物理模型便于考虑到地质方面的参数,适用面广,并且,很容易观测到开挖沉陷引起的裂缝生长和传播过程以及其它主要移动变形特征,还能够结合特殊地质与地下空间开挖条件进行试验,包括多层地下空间开挖或存在岩柱等情况。物理模型法的显著优点是开挖空间上覆岩层各分层的移动、变形及断裂过程能够直接观测到,而采用其它数理模型则做不到这点。物理模型法能够运用于各种各样复杂地质与地下空间开挖条件下的特征点移动与变形预报工作,例如,断层构造、褶皱构造、含水地层及厚冲积层等特殊地质条件,特别是在新区进行开挖沉陷规律研究及预报工作,实践经验已经证明物理模型法配合其它预报方法能够使得开挖沉陷预报工作更加卓有成效。

1.5 特殊地质与地下空间开挖条件下特征点沉陷预报

1.5.1 地表非连续变形预报方法

地层产状及上覆岩层构造形态是地表发生非连续变形的内在因素,而开挖影响则为外部条件。地表发生非连续变形的潜在原因有:断层构造、急倾斜矿层、地层软弱夹层及不整合面等。在研究地表非连续变形时,通常利用有限元方法分析地表非连续变形机理,软弱夹层以节理单元模拟,计算采用弹塑性无拉力平面有限元程序,屈服准则采用摩尔-库仑准则,分析结论认为:通过弱面介质释放大面积向应力和剪应力,使得弱面远离地下开挖空间一侧的岩体受到较小开挖破坏影响,从而引起两侧岩体发生相对滑移,预报非连续水平变形 E_F 和倾斜变形 I_F

的公式为^[3]

$$E_F = K_L \cdot E$$

$$I_F = K_h \cdot I$$

式中, E 和 I 分别为通常的水平变形和倾斜变形, K_L 和 K_h 为表示非连续变形程度的系数。

1.5.2 地表沉陷的模型识别和模型优化

地下岩层具有复杂的结构,各种地质因素包括原生的和次生的变化均会影响到岩层的组成、产状和性质,再加上开挖自下而上的影响使得岩体内部存在着各种构造、离层、节理和断裂,组成了一个非常复杂的系统。根据控制论和系统论的观点,利用模型识别和参数识别的方法,把岩体看成为一个由各种岩层、构造、破坏组成的复杂系统,量测的内容不是各个单元的特征,而是整个系统的输入(地下开挖空间的形成或移动)与输出(特征点移动与变形),并且通过这些数据推断出总体可能的特征和结构,即用模型识别方法来确定总体的力学模型及其结构和参数,从而能够在本质上反映和描述总体的性质。在具体识别时,使用下列准则函数:

$$f = \sum_i^n P_i (W_i - W_i^*)^2$$

式中, W_i 为计算值,取决于所选取的模型, W_i^* 为实测移动与变形值, P_i 为观测值相应的权, n 为观测值个数。为了识别最佳函数,可使用判别式

$$m = \left| \sqrt{\frac{P_{vv}}{n-t}} \right|$$

式中, m 为平差后单位权观测值中误差, t 为函数中误差的个数, v 为实测值与计算值之差。最后还应满足

$$|m| \leq |m^*|$$

式中, m^* 为给定的精度。模型识别的基础是已有的各种各样开挖沉陷模型。

1.5.3 曲面分布形式地层开挖地面沉陷预报方法

现行的特征点移动与变形预报方法仅适用于水平分布地层或倾斜构造地层。如果把曲面分布地层近似地当做平面构造地层来处理,这样就会增加由于计算方法不合理带来的误差。利用曲面积分的方法,并且,采用叠加原理和数值分析方法求解不能用初等函数表示出原函数的积分方程,则可以解决开挖曲面分布地层特征点移动与变形的预报问题(详细内容见本书以下有关章节)。

1.6 地面沉陷预报方法比较及发展方向

在我国,目前常用的预报特征点移动与变形值的具体方法有典型曲线法、概率积分法、负指数函数法、下沉格网法、岩体力学法、有限元及边界元法等,而概率积分法的数学模型采用随机介质理论,对地面下沉盆地的描述更为精确和合理,适用范围广泛,并且便于编程解算,因此,概率积分法的使用最为普遍。但是,目前所使用的概率积分法或其它现行的特征点移动与变形预报方法仅适用于平面构造地层,而不适用于曲面分布地层(包括褶皱及各种单斜等构造)。通常,遇到这些曲面分布地层的处理方法是把其近似地当作平面构造看待,这种利用平面构造地层的开挖沉陷模型来预报曲面分布地层的开挖破坏影响,必然会出现较

大的偏差,产生偏差的根本原因在于地表移动机理不同。如果采用曲面积分的方法建立起开挖沉降模型,利用开挖曲面分布地层的地表移动规律来进行预报,则可以消除由于方法不合理产生的偏差。其次,目前对于任意形状地下空间开挖条件下预报特征点移动与变形值时,通常采用把任意形状地下空间分割成若干个近似矩形条带,然后,每个条带当做一个矩形地下空间来进行预报,最后再进行叠加,这种处理过程较为复杂,并且带有开挖面积近似取舍误差,而如果对任意形状地下开挖空间采用曲线积分或分段积分的方法将会使问题变得简单明了。另外,对于曲面分布开挖地层和任意曲边形状地下开挖空间(地下开挖空间水平投影后的边界是由多条曲线和折线构成),要精确计算其开挖面积或开挖量还没有现成计算公式,通常解决方法是把开挖地层简单地分成几个区域,然后把每个区域当作平面构造地层来计算它们的开挖面积和开挖量,显然,这种近似处理方法也将会给开挖量计算带来偏差,而采用曲线确定积分区间且采用曲面积分的方法来进行处理,就能够消除近似方法产生的偏差。并且,现在也还没有较实用的预报下沉盆地面积及其体积的计算方法。本书针对这些问题进行了较深入地研究,并且较为完善、合理地解决。

尽管特征点沉降预报方法日臻完善,但是,在以下方面还有待于作进一步深入研究:特殊地质与地下空间开挖条件下特征点沉降预报,包括断层构造、条带空间开挖、山区地貌、斜层理状巨厚冲积层、假整合或不整合岩层、部分开挖、软弱夹层、强含水地层、急倾斜地层、开挖厚度变化大、地层露头处、小窑采区、极不充分开挖、老窑及古井等情况;获取准确的地表移动基本参数及其变化规律,尤其是预报参数和地质与地下空间开挖条件之间的变化规律、条带开挖预报参数、特殊地质与地下空间开挖条件下的预报参数变化规律、多层不规则开挖地表移动规律、观测站资料综合分析软件等内容;编制出方法便于推广和应用,以及理论上便于理解和接受的软件系统,包括国家或地区地表移动基本参数数据库、特征点沉降预报方法专家系统、特征点移动与变形通用预报软件、开挖沉降模拟系统等。

由于地层情况复杂多变、岩石力学参数不易采集、每一开挖地区地质构造存在特殊性、开挖条件多种多样、岩移参数获取困难、数理模型繁琐性等因素存在,因此,地表沉降预报研究工作任重道远,还需要进行长期艰苦努力,保证技术和资金的投入,才能够获得更方便、更精确和更完善的开挖沉降预报方法,以便为建筑物下、铁路下、水体下的开挖工程提供可靠的科学决策依据,产生巨大的经济效益、社会效益及环境效益。

1.7 本书研究内容及特点

1.7.1 分析与研究内容

褶皱构造形式地层地下三维空间开挖时单元下沉盆地和单元水平移动理论模型,任意特征点在任意方向的五种移动变形值预报公式;地下空间开挖面积和开挖量的计算公式,预报参数的解算公式,任意形状地下空间开挖时坐标系统的建立及积分区域划分方法,曲面分布地层和任意形状地下空间开挖时地面沉降面积和下沉盆地体积算法,不能够求出原函数的重积分值的数值解算方法;铁路临界变形值确定方法,地表沉降区铁路安全性预报方法、维修措施及防灾减灾技术方案;产生下沉盆地不对称性的基本原因,以及单斜、向斜和背斜构造地层开挖时,地面沉降分布特征和移动与变形曲线形态;厚冲积层开挖条件下,特征点移动与变形特征、基本模式及地层液化条件,下沉系数的简便、实用计算公式;铁路沉降预报系统软件设计,软件系统的测试技术;全国铁路灾害防治信息系统总体设计方案。

1.7.2 研究方法和主要成果

以随机介质理论为基础,采用将复杂的褶皱构造地层按轴线划分为单斜构造地层的方法和对开挖区域实行曲面积分的方法,建立曲面分布地层开挖时的地表沉陷理论模型,根据数学力学原理推导出任意特征点在任意方向的下沉、倾斜变形、曲率变形、水平移动及水平变形预报公式;分析了预报公式中参数变化规律,推导出求参公式,根据建立的开挖沉陷模型和岩层移动理论划分层状开挖空间的积分区间,确定计算坐标的数学表达式,采用数值分析方法和叠加原理解决计算不可积重积分值的问题;针对地下开挖空间形状多种多样的特点,利用多条二次曲线拟合任意形状地下开挖空间水平投影的边界(包括开挖线和停挖线位置),并且,把阶梯形状地下开挖空间划分为多个积分区域,解决任意形状地下开挖空间积分区间的划分问题,推导地下开挖空间形状系数的计算公式,然后采用曲线积分和分段积分的方法进行特征点移动与变形值的叠加计算,从而避免对任意曲边形地下开挖空间采用矩形分割的近似处理方法,利用曲线积分方法解决任意形状地下开挖空间的积分区域问题,建立便于使用的地下开挖空间坐标系,使得解决问题的思路变得简单明了;推导出曲面分布地层和任意形状地下空间开挖时地层开挖面积与体积,利用平面图形几何重心公式计算开挖空间水平投影图形的重心坐标,然后根据影响传播角和开挖空间距地面深度计算下沉盆地中心位置的坐标,利用特征点沉陷预报方法和插值计算下沉等值点方法求得每条下沉等值线上360个地表点的坐标,再利用解析方法推导出每条下沉等值线所围成的面积、下沉盆地面积及下沉盆地体积的计算公式。

根据岩层与地表移动基本原理,基于褶皱构造层状空间、任意形状地下开挖空间条件下特征点在任意方向的移动与变形值预报方法,并顾及复杂地质、地下开挖空间形状、地下工程、地形、铁路等级及其附属设施结构等因素,分析铁路遭受地表沉陷影响的特征,总结铁路沉陷规律,确定铁路安全性的评估方法,提供防治灾害事故的措施;基于铁路沉陷规律,本书定义铁路临界变形值,研究铁路临界变形值的计算方法,提供铁路临界倾斜变形、临界曲率变形和临界水平变形的参考值,并且,进一步阐述铁路临界变形值之间的内在联系和预报方法,探讨铁路安全性及其可能出现灾害事故的评估方法,提供铁路安全防护方法、维修措施及防灾减灾技术方案,以便减弱或消除铁路遭受地面沉陷的破坏影响;本书研究了地表沉陷对路基产生的破坏影响,分析、总结路基沉陷特征,给出路基稳定性和地下矿柱强度的验算方法,以及路基出现坍塌或滑坡等灾害的预报方法,并且,提供预防和治理路基沉陷的技术措施;地表沉陷导致桥梁发生沉陷,本书讨论了地表沉陷对桥梁的破坏影响,提出防治桥梁沉陷的技术措施;在铁路沿线进行地下开挖活动直接威胁到隧道的安全使用,本书论述了地下开挖活动导致隧道沉陷的六种表现形式,初步分析地层沉陷对隧道的破坏作用,研究了隧道沉陷的防护技术。

为了便于本项研究成果的推广应用,编制了铁路沉陷预报系统的计算和管理方面的应用软件,包括预报程序、求参程序、计算程序、使用说明及数据管理方面的软件;采用中文菜单技术人机对话,实现在褶皱构造(包括单斜构造和平面构造)地层和任意形状地下空间开挖时,预报任意特征点在任意计算方向的五种移动变形值、计算地下开挖面积和体积、下沉盆地面积及其体积,以及求解预报参数等方面的自动化;针对复杂繁琐的特征点移动与变形预报公式及其软件系统,本书提出了高效、合理的测试方法,设计出性能可靠、测试面广的测试用例,完成对铁路沉陷预报系统的设计思想、数学模型、心理障碍、计算方法、预报公