

文章编号:1005-2712(2003)01-0020-05

工程开挖地表移动的随机介质模型及监测技术

贺跃光, 刘宝琛

(中南大学, 湖南 长沙 410083)

摘要: 随机介质理论模型应用于自重应力作用型矿山地表移动取得了巨大成功。笔者综合分析该模型在构造应力作用型矿山地表沉陷的应用及其在边坡、基坑工程开挖和城市地下工程开挖引起的地表移动与变形中的应用, 然后探讨上述各类开挖工程地表移动与变形的监测技术。

关键词: 随机介质; 工程开挖; 地表移动

中图分类号: TD325⁺.4; TU433

文献标识码: A

0 前言

人类对工程开挖引起的地表移动与变形模型的研究是从地下矿山、尤其是从自重应力型地下煤矿开始的。作为地下工程开挖的附效应, 开采沉陷的研究已有较长的历史, 在各种开采现象的研究中, 地下煤炭开采所引起地表沉陷的研究较多: 建立了数量众多的地表移动观测站; 创建了各种预计理论; 提出了各种计算方法; 开发了大量的计算软件。地表移动研究的理论与方法日趋成熟, 其中随机介质理论模型尤为适应。因此, 从自重应力型煤矿地表沉陷的随机介质理论模型分析出发, 结合构造应力型矿山的特点, 研究构造应力作用下的矿山开采沉陷规律; 结合露天矿山、铁路、公路以及基坑工程的特点, 分析随机介质理论用于边坡及基坑工程开挖引起的地表移动与变形规律; 结合地下工程的特点, 探讨该理论对地下工程开挖引起的地表移动与变形规律的适应性。在上述研究基础上, 探讨工程开挖的位移与变形监测技术, 具有重要现实意义。

1 开采沉陷理论的研究历史与现状

地表开采沉陷问题早已被人们所注意。早在15世纪, 比利时曾公布一项法令: 在列日城下开采时, 开采深度不得小于100m。1825年、1839年比利时组成专门委员会对列日城受采矿影响而引起的破坏进行调查, 形成了最初的开采影响传播的“垂线理论”

假设; 1858年, 以观测资料为基础, Gonot提出了“法线理论”, 认为采空区上、下边界开采影响范围可用相应点的层面法线确定; 1885年, 法国人法约尔利用模型研究, 提出了开采沉陷的“拱形理论”; 1885~1897年, 豪斯建立了采空区上方有三带分布的沉陷模式, 即在采空区上方首先形成梯形的冒落带和裂隙带, 高度为采厚的30~50倍, 冒、裂带上方为纯粹的弯曲带。

19世纪末, 欧洲工业大发展对有用矿产的需求大幅增加, 促使沉陷理论研究逐步深入, 在研究各种沉陷分布与各类角度的同时, 也开始了开采地表下沉与变形规律研究。二次世界大战后, 人们着重从连续介质理论和非连续介质理论来研究开采沉陷问题。如目前广泛使用的弹性、塑性有限元法、边界法和离散元法等都是建立在连续介质理论的基础上; 而非连续介质力学中最有成效的是随机介质理论。

非连续介质理论中的随机介质理论、碎块体理论等都是通过理论本身的分析建立基本方程, 并用它与实地观测到的结果作对比分析, 来求取方程中的有关参数, 这些参数体现了地质、开采、上覆岩层结构和性质在地表的反映。用连续介质力学方法求解岩层移动变形的解析解一般较难, 现行的解析解也只能是作了相当多的简化后的弹性力学问题的简化, 且主要是针对简单开采条件(单一工作面开采水平煤层)而言, 而用反分析法求得的参数一般也只能是作为一种等价参数, 而且不可能唯一。

收稿日期: 2002-09-23

作者简介: 贺跃光(1966), 男, 湖南桃江人, 博士, 高级工程师, 主要从事工程灾害监测与环境治理、测绘方面的教学与科研工作;

刘宝琛(1932-), 男, 辽宁开原人, 博士, 教授, 博士导师, 中国工程院院士, 波兰科学院外籍院士, 主要从事岩石力学与岩土工程方面的研究工作。

然而,无论连续介质理论还是非连续介质理论,应用于开采沉陷及岩层地表移动的研究,所推导的地表位移和变形应当同实地观测到的数据(事实)相吻合,才能得到实用。通常,按所采用方法的基础,地表移动预计方法可分为以下几类。

(1) 基于实测资料的经验方法。即通过对大量开采沉陷实测资料的数据处理,确定预计各种移动变形值的函数形式和预计参数的经验公式,这是当前最为可靠的一种预计方法。

(2) 理论模拟方法。把岩体抽象为某个理论模型,按照这个模型计算受开采影响岩体产生的移动、变形和应力的分布情况。

(3) 影响函数法。根据理论研究或其他方法确定微小单元开采对岩层或地表的影响(以影响函数表示),把整个开采对岩层或地表的影响看作是采区内所有微小单元开采的总和,据此计算整个开采引起岩层和地表的移动和变形。此法所用参数常常根据实测资料求得。

这些理论除阐述初始开采沉陷或地表移动模式外,最后均归结为确定开采破坏的范围。其意义在于:对煤矿主要用于划定煤柱,对金属矿主要用于划定矿柱,对于山地矿区,用于研究山体稳定、塌陷坑汇水及灌泥等难题。

在我国,煤矿地表移动规律的研究取得了长足进展^[1~2],建立了以概率积分法^[3]、负指数函数法、典型曲线法为基础的地表变形预计方法体系^[4],以及适合我国实际情况的积分格网法、威布尔分布法、样条函数法、双曲函数法、皮尔森函数法、山区地表移动变形预计法、三维层状介质理论预计法和基于托板理论的条带开采预计法等。其中以概率积分法的应用尤为广泛,极大地推动了“三下开采”事业的发展^[5~7],使我国在该领域进入国际先进之列。

我国《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》中列出的预计方法为概率积分法、负指数函数法、典型曲线法,其中随机介质理论概率积分法使用最为广泛。

2 构造应力作用型矿山地表沉陷规律

2.1 构造应力作用型矿山地表沉陷特征

迄今为止,国内外煤矿开采地表移动规律及地表变形预计方法,归纳起来均为“自重应力作用下的煤矿地表移动规律”。然而,无论是急倾斜崩落法开采冶金矿山还是冒落法开采急倾斜煤矿,其开采沉陷均属“构造应力作用下的地表移动”。它们的共同

特点为:地表开采沉陷在受自重应力作用的同时,还受构造应力作用,以及矿层倾角大小、顶板岩体节理发育程度与结构形式、开采方法与放矿规律的支配。当矿区的残余构造应力显著时,构造应力影响会改变地表沉陷盆地的形态,并使沉陷盆地的范围急剧扩大,甚至使竖井及工业广场落入破坏区而无法继续采矿,这种情况在国内外急倾斜崩落法开采冶金矿山已屡见不鲜。如俄罗斯北乌拉尔彼斯强矿区的北彼斯强铁矿,原岩中残余构造应力随深采显现,移动角及边界角值急剧变缓。上盘岩层移动角由73°变为58°,上盘边界角从66°变为37°,下盘边界角从38°变为31°,从而使开采地表沉陷与开裂波及到中央主井的整个工业广场,其相应采深370m, $\sigma_z = 9.9 \text{ MPa}$, 水平向原岩构造应力 $\sigma_1 = 9.6 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 1.5 \text{ MPa}$ 。类似情况在乌拉尔、克里沃罗格、戈尔内索里铁矿区大量出现。在中国,金店铁矿、程潮铁矿最为典型:当采深超过250m时,随着原岩应力场中残余构造应力的显现,移动角及边界角值突然变缓,导致井筒开裂、工业广场及构筑物破坏,而无法按正常途径进行深部开采设计。现场实测,在采深340~350m处, $\sigma_z = 6.1 \sim 9.3 \text{ MPa}$, 水平向残余构造应力 $\sigma_1 = 13.4 \sim 22.3 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 4.1 \sim 11.0 \text{ MPa}$ 。

由于黑色冶金、有色冶金、黄金矿山具有与沉积煤矿不同的岩体、地质、开采条件,因而采用空场法、留矿法、充填法开采的矿山难于用煤矿通用的方法来研究地表移动规律及进行地表变形预计。此外,由于崩落法采矿技术是一种生产能力大、效率高、成本低,惟一可与露天开采媲美的地下采矿技术,国内外较大的地下矿山都是采用崩落法开采,因此崩落法开采冶金矿山沉陷规律研究更显突出与急需。如武汉钢铁公司矿业公司为获得采矿设计所需移动角值,先后在金店铁矿东区、西区,程潮铁矿东区开展研究。

由于连续介质和非连续介质理论应用于矿山开采沉陷,描述开采沉陷过程只是宏观上的相似,而要揭示开采空间上覆岩体内部的移动和变形有很大的局限性,非连续岩体是由连续岩体逐渐破坏、断裂形成的,它与开采的进程具有直接的关系。

综合“三下开采”发展对急倾斜矿体崩落法开采地表移动规律研究的需要,其实质为“构造应力作用下的地表移动规律研究”,剖析国内外该问题研究现状,探讨其不同于“自重应力作用下地表移动规律研究”的一系列特点,及对该项工作研究的经验与教训,从而确定按改化岩移随机介质理论方法解决此

类工程问题,发展开采沉陷学,具有重要意义^[6~8]。

综上所述,对矿床的开采、地质、岩性、原岩应力场条件的基本判断是确定所研究矿体地表开采沉陷是属于自重应力作用型还是属于构造应力作用型的关键。

2.2 构造应力作用下的地表移动规律研究现状

国际上,前苏联对构造应力场条件下岩层移动特征进行了长期研究与系统工程实践。20世纪70年代初,在乌拉尔铁矿区,进行了大量地表移动参数与构造应力相互关系的现场实测与机制研究。在乌拉尔和哈萨克斯坦金属矿,如波克罗夫铁矿、北彼斯强铁矿、红色近卫军铜矿、戈罗布拉戈达铁矿区、高山铁矿区、卡契卡尔金矿区、西卡拉日阿里矿区、索克洛夫铁矿区等进行了概化地应力确定。发现构造应力的两个主应力之比均很高:波克洛夫矿区为1:6,北彼斯强铁矿为1:6.4,卡契卡尔金矿区为1:4,索克洛夫铁矿区为1:5,其他矿区为1:2到1:3。从1972年开始,重新建立了地表移动观测站,并先后在北彼斯强、新彼斯强、哥洛布格达特、索克洛夫等矿区进行了系统观测,积累了大量构造应力场作用下的地表边界角、移动角、断裂角资料,成功地进行了“三下开采”与井筒保护。研究与实践发现,所有沿用煤矿地表移动规律及预计方法的尝试均未成功^[6]。

在美国,某矿山矿块崩落开采后,摄影记录表明该地表出现以同心圆式的断裂分布所构成的塌陷区。在拉底面积以上直到圆心塌陷区之间的矿岩柱已经崩落和松散,在某一时刻如果测算出地表沉陷体积和井下放出矿岩的原生体积,则前者必然小于后者。两者之差表明崩落矿柱内的空隙体积可能以两种形式存在:一是由于矿岩崩落所指的岩石松胀现象;另一种是以大的空洞出现。后者由于上覆岩体中存在整体性好的坚硬岩体不能自然崩落。

前苏联研究认为:陷坑岩石充填采空区的充填系数 P (塌陷坑体积与采空区体积之比)与煤层倾角 α 的关系为: $P = 1.4\alpha - 41.5$,即认为 $\alpha > 30^\circ$ 时,可能存在塌陷坑岩石充填采空区的现象。

寇新建等人采用实地观测及弹性损伤力学有限元模型等分析方法,认为金属矿山岩移过程的几大特点为:一是残余构造应力的影响,使得金属矿山岩移规律,特别是地表水平移动规律与煤矿有重大差别;二是十分发育的节理裂隙对岩移具有控制作用,特别是在较坚硬的覆岩下开采时更是如此;第三,特别是地质、采矿因素使得其岩移时间、移动过程和移

动量值等方面与煤矿有很大的不同。一般情况下,金属矿山岩移过程较长而且不连续性,其崩落和移动表现为阵发式和周期性。

在国内,对金属矿山开采沉陷规律的研究,主体为建立各类观测站,确定移动角值。长沙矿冶研究院为解决金属矿山开采沉陷与急倾斜矿山开采沉陷问题,应用岩移随机介质理论先后进行了“抚顺型下沉盆地”、“急倾斜无底柱分段崩落法开采的岩体移动规律”、“金属矿山三下开采与岩移随机理论应用”、“黄金矿山岩移随机理论应用”等研究,对构造应力作用下地表移动规律研究进行了大量成功尝试。近10年来,一些采用急倾斜崩落法开采的冶金矿山从生产需要出发,也多次沿用了一般岩石工程通用的各类数值分析方法,但效果欠佳;套用煤矿地表移动预计通用方法,同样未获成功,从而使急倾斜煤矿地表移动规律研究同样未得到实质性进展。

综合国内外状况,目前构造应力作用下的地表移动规律难题,除应用岩移随机介质理论外,还未显示有望成功的迹象^[7~8]。

2.3 改化随机理论是解决此问题的有效方法

剖析构造应力作用下的地表移动规律研究的上述特点,并以此出发研究其对岩体及地表移动的作用机制,选择能反映上述特点及作用机制的研究方法,是确保成功的关键。

改化随机理论研究主要是要结合急倾崩落开采金属矿与急倾煤矿实际,就倾角、构造地应力、地质条件与破碎体形态、采矿方法与放矿规律来建立对应影响函数、数学模型、预计方法与程序,以确定构造应力作用下的地表移动规律,发展开采沉陷学并服务于“三下”采矿与井筒保护,促进矿区经济可持续发展。

急倾斜崩落法开采金属矿山与急倾煤矿,其地表沉陷属构造应力作用下的地表移动规律范畴,不同于自重应力条件下现有煤矿地表沉陷与地表移动规律研究。其一系列特点决定了用各类数值分析法及未经改化的常用煤矿地表移动与变形预计法无法运用;它不同于金属矿山空场法、留矿法、充填法开采的硬岩矿山,又使其有可能进行规律性研究,工程实践已预示了改化随机理论有望成为最可取的方法^[8~12]。

3 边坡及基坑工程开挖

随着国民经济的发展,公路、铁路、水利水电、露天矿山等工程开挖形成大量高陡坡。其中以露天矿

山边坡研究的历史最长。对露天煤矿、黄金矿山、铁矿、锰矿、磷矿、有色矿山等而言,边坡稳定是安全生产的关键。此外,大型露天矿山大多毗邻大型工业及民用建筑,露天开采引起的邻近边坡的移动与变形直接关系到附近的工业与民用建筑的安全。因此,必须掌握采动边坡的稳定性及其附近地表的移动与变形规律。

深基坑建筑技术在高层建筑地下室、城市地铁、合流污水处理系统、过江隧道等市政工程中得到广泛应用。随着基坑规模和开挖深度的增大,使得原来并不突出的临时围护结构变形和稳定已成为工程界十分关注的问题。此外随着城市各类建筑物密集程度增大,相邻环境、地下管线、地面交通对基坑开挖以及建筑之后所产生的地表变形要求越来越严格。基于基坑工程开挖岩土体的特性,尝试用随机介质理论研究基坑开挖引起的地表移动与变形具有重要的工程意义。

基坑工程开挖引起的地表移动与变形主要表现在两个方面:基坑开挖导致岩土体地下水位下降,引起地表沉降;侧壁岩土体向开挖空间移动引起的周围地表移动与变形。

4 城市地下工程的发展趋势及其引起地表移动与变形的研究

地下工程是指建在地下的各种工程设施。从人类早期的穴居、19世纪矿山工程的大规模建设,到始于1930年的一些人类活动由地面移到地下,人类对地下空间的利用经历了三次浪潮。20世纪末,随着人类环境意识、资源持续利用意识的不断提高,推动了地下空间利用的第四次浪潮的兴起和发展。尤其是城市地下空间是一个巨大而丰富的资源,充分利用这个资源,可大大地提高土地资源的集约化使用^[13-16]。

随着我国经济建设的快速发展,城市化水平也正在迅猛发展。根据气象卫星遥感资料判断和测算,1986~1996年的10年间,全国31个特大城市占地面积增大了50.2%。据预测,至2010年,我国城市总数将从1996年的640座增至1000座左右,这对人均耕地面积较少的我国是一个十分严峻的问题。从世界各国大中城市发展的历史来看,综合利用城市地面及地下空间是解决上述问题的重要途径之一。

城市地下工程的特点是它们全部埋置在地下岩体内,其变形特性、物理结构、初始应力场的分布、温度和水侵蚀效应等众多方面具有明显的非均质性、

离散性、非连续性和非线性等特点,致使地下建筑在施工、使用阶段表现出相当独特和复杂的力学特性。其安全、经济和正常使用,都与其所处的工程地质环境密切相关。由于地下工程破坏了岩体的初始平衡条件,引起岩体内应力重新分布,除了少数地质条件特别优秀,岩体强度能适应这种变化了的应力条件外,围岩常常会产生各种形式的变形、破坏、特别严重者可一直影响到地表。

由于岩石工程的复杂性,一般难以用封闭形式的解析公式定量地求解问题。在这方面,从1960年后,陆续问世的有限元法、离散元法、边界元法及各种耦合算法和程序充分发挥了各自的长处,在很大程度上促进了岩石软科学与岩体地下工程的发展。目前最为成熟和有效的有限元法与程序仍在不断更新和发展,离散元法程序也在不断出现。另一方面又出现了一些新的算法和程序,如刚性有限元法、广义有限元法、运动单元法、界面元法、块体单元法、块体理论、DDA法、流行元法、FLAC、无网格法以及由于优化及人工智能需要而推出的遗传算法,如蚁群算法、细胞发生器算法和模拟退火算法等等。

城市地下工程开挖影响指的是开挖引起的围岩移动与地面沉降。隧道开挖引起的地面沉降,其横剖面一般呈盆状,可用概率积分来描述^[15]。对于浅埋和超浅埋隧道开挖引起的地面沉降,最大下沉值为:①开挖支护前的下沉。②地下抽排水引起的下沉。③开挖支护后的下沉等构成。

而随机介质理论用于岩土地下工程开挖引起的地表移动和变形预计可以达到较高的精度^[17,18]。

5 监测技术

开挖工程大多涉及地下建筑。地下建筑是指建造在土层或岩层中的各种建筑物或构筑物。近30年来,由于在坚硬岩石中和复杂地质条件下岩土层中掘进开挖技术有了长足的进步,岩石的坚硬已从对地下空间的不利因素转变为有利因素,使得地下空间的跨度可以增大、岩体可以经受更高的掘进速度,尤其是以激光导向技术和GPS定位技术为代表的地下施工定向技术,以及遥感技术和探地雷达技术为代表的地下勘测技术和地下掘进及衬砌的自动控制施工技术已在实际工程中得到一定程度的应用,这使得地下空间开发范围更广、规模更大、水平更高、从而导致现代地下工程发展迅速、类型多样。

然而,地表构筑物只允许微小的沉降和变形而不影响其正常使用和造成损害。根据国内外的

经验,最为敏感的构(建)筑物所能承受的最大地表倾斜为 2.5mm/m ,最大水平拉伸应变为 1.5mm/m 。若地表变形小于上述极限值,则构(建)筑物可安全使用而不会发生可见的损害。而当建筑物所在地表的沉降变形超过该建筑物的允许最大变形值时,则首先要求较准确地预计各种不同的开挖所引起岩土体及地表面的沉降和变形的数值及其分布规律,其次根据地面变形大小、性质以及其结构特点,设计建筑加固措施。

随着地下工程设计理论和施工技术的发展,在获取地下工程设计的基本数据、进行设计方案的试验论证和施工过程的监控中,监测越来越成为设计和施工的连接点和必要环节。自上世纪 60 年代开展新奥法施工技术以来,地下工程监测越来越受到重视,并作为地下工程施工和设计不可分割的重要组成部分。同时,监测技术对工程计算理论、工程施工技术水平产生了巨大和深刻的影响^[19]。

目前,在工程开挖监测领域,已发展了许多先进的监测技术,如数字化近景摄影测量系统^[20]、GPS 变形监测系统等。

参考文献:

- [1] 刘宝琛,廖国华.煤矿地表移动的基本规律 [M].北京:中国工业出版社,1965.
- [2] 成枢.岩层与地表移动数值分析新方法 [M].北京:中国矿业大学出版社,1998.
- [3] 刘宝琛.矿山岩体力学概论 [M].长沙:湖南科技出版社,1987.9.
- [4] 何国清,杨伦,冯赓娣,等.矿山开采沉陷学 [M].徐州:中国矿业大学出版社,1991.4.
- [5] 颜荣贵.地基开采沉陷及其他地表建筑 [M].北京:冶金工业出版社,1995.
- [6] H. 克拉茨.采动损害及其防护 [M].北京:煤炭工业出版社,1983.
- [7] J. Litwinisayn. The theories and model research of ground. Collery eng. 1985(10).
- [8] 吴侃,葛家新,王铃丁,等.开采沉陷预计一体化方法 [M].北京:中国矿业大学出版社,1998.
- [9] 贺跃光,颜荣贵,朱殿柱.构造地应力作用下的地表移动规律研究 [J].矿冶工程,2000,20(3):12~14.
- [10] 贺跃光,颜荣贵,曾卓乔.急倾斜矿体开采地表沉陷与概化地应力研究 [J].中南工业大学学报,2001,32(2):122~126.
- [11] 尹德潜.损伤理论在金属矿岩移理论研究中的应用 [D].长沙:中南矿冶学院,1993.
- [12] 刘宝琛,阳军生,张家生,等.露天开挖及疏水引起的地面沉降及变形 [J].煤炭学报,1999,24(1):39~42.
- [13] 刘宝琛.综合利用城市地面及地下空间的几个问题 [J].岩石力学与工程学报,1999,18(1):109~111.
- [14] 钱七虎.迎接我国城市地下空间开发高潮 [J].岩石工程学报,1998,20(1):112~113.
- [15] 刘天泉,钱七虎.城市地下岩土工程技术发展动向 [J].煤炭科学技术,1998,20(1):1~5.
- [16] 钱七虎.地下空间开发利用的第四次浪潮及中国的现状、前景和发展战略 [A].中国岩石力学与工程学会第六次学术大会论文集 [C].北京:中国科学技术出版社,2000.84~89.
- [17] 阳军生.地铁建设地表移动及变形研究 [D].长沙:中南工业大学,1996.
- [18] 张家生.地表移动理论及数值分析方法研究 [D].长沙:中南矿冶学院,1992.
- [19] 夏才初,李永盛.地下工程测试理论与监测技术 [M].上海:同济大学出版社,1998.8.
- [20] 贺跃光,王秀美,曾卓乔,等.数字化近景摄影测量系统及其应用 [J].矿冶工程,2001,21(4):1~3.

Stochastic Medium Model and Monitor of Surface Movements Due to Excavation

HE Yue-guang, LIU Bao-chen

(Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Using stochastic medium model in surface movements of self-weight stress mining have been made great successful. In this paper, using stochastic medium in surface movements and its monitor of open-pit slope, foundation pit and city underground engineering is analysed.

Keyword: stochastic medium; engineering excavation; surface movements