

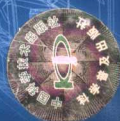
# 厚松散层下

# 条带开采技术研究

李德海 等著

HOU SONGSANCENG XIA TIAODAI KAICAI JISHU YANJIU

 中国科学技术出版社



# 厚松散层下条带开采技术研究

李德海 等著

中国科学技术出版社

• 北 京 •

**图书在版编目(CIP)数据**

厚松散层下条带开采技术研究/李德海等著. —北京:  
中国科学技术出版社, 2006. 7

ISBN 7-5046-4423-4

I. 厚... II. 李... III. 采煤方法—研究  
IV. TD823. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 076480 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志, 未贴防伪标志的为盗版图书。

**责任编辑** 王 蕾 刘社育

**责任校对** 林 华 张永春

**责任印制** 李春利

**中国科学技术出版社出版**

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码: 100081

电话: 010-62103210 传真: 010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京玥实印刷有限公司印刷

\*

开本: 787 毫米×960 毫米 1/16 印张: 12.75 字数: 236 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1—1050 册 定价: 36.00 元

---

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、  
脱页者, 本社发行部负责调换)

## 内 容 提 要

本书系统地论述了厚松散层地层的物理力学特性及其分布特征;分析了厚松散层地层沉陷的主控因素及沉陷机理;进行了厚松散层条件下开采地表移动变形及条带开采煤柱稳定性的相似材料模拟试验研究;对厚松散层下开采地表移动变形预计的概率积分法进行了修正;对厚松散层下条带开采的实践进行了分析研究;对重复采动引起地表移动变形的问题进行了模拟试验、灰色系统理论分析等。

本书可供从事煤炭工业科研、设计等业内工程技术人员和教学工作人员参考。

## 前 言

世界各国对压煤开采问题都很重视,进行了大量的研究工作。长期以来人们根据实测资料采用多种研究手段,经过不懈努力,对一般条件下开采引起的岩层及地表移动变形规律有了比较深刻的认识,但对于特殊地质采矿条件下开采引起的岩层及地表移动变形问题还有很多研究工作需要进行,厚松散层下开采引起的地表移动变形问题就是其中之一。

厚松散层下开采引起的地表移动变形特征的研究开始于20世纪80年代,我国在华东、华北地区具有厚冲积层地层的煤矿区地表移动观测资料中,发现了地表下沉值大于煤层开采厚度、地表移动变形范围扩大、地表移动变形速度加快等现象。许多学者和科学技术人员随后针对这些问题进行了研究,并取得了一些成果。

条带开采是解决压煤开采问题的方法之一,而目前关于在厚松散层下条带开采引起地表移动变形问题的研究成果很少。

几年来,河南理工大学岩层控制与特殊开采研究所在永城矿区、焦作矿区、辉县吴村煤矿等具有厚松散层的矿区进行了大量的条带开采试验、地表移动观测、室内模拟试验等研究工作,本书即是对部分研究工作的总结。

全书内容共分11部分,分别对厚松散层的分布及特征,厚松散层下开采地表沉陷机理,相似材料模拟研究,厚松散层下开采概率积分法的修正,厚松散层下条带开采地表沉陷主控因素,条带煤柱受力分析及稳定性研究,条带开采相似模拟试验,条带煤柱稳定性的数值模拟研究,厚松散层下条带开采实践,条带开采实测资料分析,重复采动对地表移动的影响进行了论述。

本书由李德海教授制定撰写大纲、内容要求并修改定稿,李德海、宋长胜、李东升、李明金、余华中均撰写了部分内容。

在本书撰写过程中,得到了长期与我们合作的焦作煤业(集团)公司、永城煤电(集团)公司、鹤壁煤业(集团)公司、郑州煤电(集团)公司、焦作金科尔(集团)公司、辉县市吴村煤矿等许多单位的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者的学识有限,书中难免存有不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2006 年 6 月

# 目 录

|                                  |             |
|----------------------------------|-------------|
| <b>1 厚松散层的分布及特征 .....</b>        | <b>(1)</b>  |
| 1.1 厚松散层的定义及分布 .....             | (1)         |
| 1.2 厚松散层的成分 .....                | (2)         |
| 1.3 厚松散层结构、水文地质和工程地质特征 .....     | (3)         |
| 1.3.1 厚松散层工程地质层组的划分 .....        | (3)         |
| 1.3.2 厚松散层土体结构特征 .....           | (3)         |
| 1.3.3 土体结构对孔隙水压力分布和沉积的影响 .....   | (4)         |
| 1.3.4 水位下降对超静孔隙水压力及地面沉陷的影响 ..... | (4)         |
| 1.4 厚松散层的土体应力—应变分析 .....         | (4)         |
| 1.4.1 土体的非线性和非弹性 .....           | (5)         |
| 1.4.2 土体塑性体积应变和剪胀性 .....         | (5)         |
| 1.4.3 土体固结压力的影响 .....            | (6)         |
| 1.5 厚松散层土体的固结 .....              | (7)         |
| 1.5.1 厚松散层土体的固结变形 .....          | (7)         |
| 1.5.2 比奥固结理论 .....               | (7)         |
| 1.5.3 土体固结沉降计算 .....             | (9)         |
| <b>2 厚松散层下开采地表沉陷机理 .....</b>     | <b>(10)</b> |
| 2.1 松散层土体的工程、力学特性 .....          | (11)        |
| 2.1.1 松散层土体的地质构成 .....           | (11)        |
| 2.1.2 松散层土体的物理、力学性质 .....        | (11)        |
| 2.2 采动影响上覆岩土层内的应力分布 .....        | (12)        |
| 2.2.1 主应力分布 .....                | (12)        |
| 2.2.2 铅直应力分量分布 .....             | (14)        |
| 2.2.3 水平应力分量分布 .....             | (15)        |
| 2.3 开采沉陷土体变形 .....               | (15)        |

|          |                        |             |
|----------|------------------------|-------------|
| 2.3.1    | 采动土体孔隙水压力变化            | (15)        |
| 2.3.2    | 采动土体主固结变形              | (17)        |
| 2.3.3    | 黏性土的次固结变形              | (18)        |
| 2.4      | 土层的变形位移                | (19)        |
| 2.4.1    | 土层内部变形情况               | (19)        |
| 2.4.2    | 土层下沉及水平移动              | (20)        |
| <b>3</b> | <b>相似材料模拟研究</b>        | <b>(21)</b> |
| 3.1      | 相似模拟试验理论概述             | (21)        |
| 3.1.1    | 相似三定理                  | (22)        |
| 3.1.2    | 相似准则                   | (22)        |
| 3.2      | 相似材料模拟试验设计             | (23)        |
| 3.2.1    | 试验的目的及特殊性              | (23)        |
| 3.2.2    | 相似材料的选取                | (23)        |
| 3.2.3    | 模拟的地质采矿条件              | (23)        |
| 3.2.4    | 模型架及相似系数的确定            | (24)        |
| 3.2.5    | 相似材料配比及用量              | (25)        |
| 3.2.6    | 模型的制作与加载               | (26)        |
| 3.2.7    | 模型观测站的布设与观测            | (28)        |
| 3.3      | 试验结果分析                 | (30)        |
| 3.3.1    | 覆岩破坏及三带特征              | (30)        |
| 3.3.2    | 岩层内部下沉系数               | (31)        |
| 3.3.3    | 岩层及地表移动特征              | (33)        |
| 3.3.4    | 下沉盆地形态分析               | (34)        |
| <b>4</b> | <b>厚松散层下开采概率积分法的修正</b> | <b>(37)</b> |
| 4.1      | 概率积分法理论                | (37)        |
| 4.1.1    | 随机介质模型                 | (38)        |
| 4.1.2    | 开采沉陷随机介质模型基本解          | (38)        |
| 4.2      | 厚松散层情况下模型预计存在的问题       | (40)        |
| 4.2.1    | 试验结果与预计对比              | (40)        |
| 4.2.2    | 实测结果与预计差异              | (41)        |
| 4.3      | 厚松散层下开采预计的概率积分修正模型     | (43)        |
| 4.3.1    | 下沉半盆地形态特征              | (43)        |

|          |                          |             |
|----------|--------------------------|-------------|
| 4.3.2    | 地表移动预计修正模型的建立            | (43)        |
| 4.3.3    | 修正模型预计实施方法               | (47)        |
| <b>5</b> | <b>厚松散层下条带开采地表沉陷主控因素</b> | <b>(48)</b> |
| 5.1      | 厚松散层下开采的沉陷特性             | (48)        |
| 5.2      | 开采沉陷的影响因素                | (49)        |
| 5.2.1    | 覆岩力学性质、岩层层位的影响           | (50)        |
| 5.2.2    | 覆岩岩体结构的影响                | (51)        |
| 5.2.3    | 松散层对地表移动特征的影响            | (53)        |
| 5.2.4    | 煤层倾角的影响                  | (53)        |
| 5.2.5    | 开采深度和开采厚度的影响             | (54)        |
| 5.2.6    | 重复采动的影响                  | (54)        |
| 5.2.7    | 采煤方法和顶板管理方法的影响           | (55)        |
| 5.2.8    | 时间过程的影响                  | (55)        |
| 5.3      | 厚松散层下条带开采地表沉陷的主控因素       | (55)        |
| 5.3.1    | 对影响因素的分析                 | (56)        |
| 5.3.2    | 主控因素重要性排序                | (57)        |
| <b>6</b> | <b>条带煤柱受力分析及稳定性研究</b>    | <b>(59)</b> |
| 6.1      | 国内外研究条带开采的历史和现状          | (59)        |
| 6.2      | 条带开采的研究方法                | (59)        |
| 6.3      | 国内外煤柱设计理论综述              | (59)        |
| 6.3.1    | 有效区域理论                   | (60)        |
| 6.3.2    | 压力拱理论                    | (62)        |
| 6.3.3    | A. H. 威尔逊(WILSON)理论      | (63)        |
| 6.3.4    | 核区强度不等理论                 | (64)        |
| 6.3.5    | 大板裂隙理论                   | (65)        |
| 6.3.6    | 极限平衡理论                   | (65)        |
| 6.4      | 各种理论的优缺点                 | (66)        |
| 6.5      | 极限平衡理论计算公式修正             | (67)        |
| 6.5.1    | 引言                       | (67)        |
| 6.5.2    | 极限平衡理论综述                 | (67)        |
| 6.5.3    | 应用弹性理论建立模型并进行理论推导        | (69)        |
| 6.6      | 条带设计的弹性理论之复变函数模型         | (76)        |

---

|          |                       |             |
|----------|-----------------------|-------------|
| 6.6.1    | 引言                    | (76)        |
| 6.6.2    | 力学分析及相应假设             | (76)        |
| 6.6.3    | 力学模型及理论公式的推导          | (76)        |
| 6.6.4    | 实例验证                  | (86)        |
| 6.6.5    | 煤柱的拉断破坏               | (87)        |
| 6.6.6    | 含弱面的煤柱稳定性分析           | (88)        |
| <b>7</b> | <b>条带开采相似模拟试验</b>     | <b>(90)</b> |
| 7.1      | 相似模型设计                | (90)        |
| 7.1.1    | 模拟原型                  | (90)        |
| 7.1.2    | 模型架                   | (90)        |
| 7.1.3    | 相似比                   | (90)        |
| 7.1.4    | 相似材料配比及用量             | (90)        |
| 7.2      | 模型的制作                 | (91)        |
| 7.3      | 模型的加载                 | (92)        |
| 7.4      | 模型的开采与观测              | (94)        |
| 7.5      | 试验结果及分析               | (94)        |
| 7.5.1    | 方案Ⅰ模型试验结果及分析          | (94)        |
| 7.5.2    | 方案Ⅱ模型试验结果及分析          | (95)        |
| 7.6      | 总结                    | (97)        |
| <b>8</b> | <b>条带煤柱稳定性的数值模拟研究</b> | <b>(98)</b> |
| 8.1      | 概述                    | (98)        |
| 8.2      | 有限元程序简介及分析            | (99)        |
| 8.2.1    | 有限元法概述                | (99)        |
| 8.2.2    | 有限元法的特点               | (99)        |
| 8.2.3    | 有限元法的解题步骤             | (100)       |
| 8.2.4    | 非线性有限元分析              | (102)       |
| 8.2.5    | 有限元分析程序简介             | (104)       |
| 8.3      | 计算模型的建立               | (105)       |
| 8.3.1    | 建模程序                  | (105)       |
| 8.3.2    | 计算模型及结果图形输出           | (109)       |
| 8.3.3    | 关键点应力值                | (111)       |
| 8.4      | 数值模拟结果分析              | (115)       |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| <b>9 厚松散层下条带开采实践</b>    | (116) |
| 9.1 概述                  | (116) |
| 9.1.1 采区情况              | (120) |
| 9.1.2 厚松散层的工程地质层组划分     | (121) |
| 9.2 条带开采设计              | (121) |
| 9.2.1 托板的筛选             | (121) |
| 9.2.2 条带开采的优化设计         | (122) |
| 9.2.3 条带开采地表移动和变形预计     | (124) |
| 9.3 条带开采的观测研究           | (125) |
| 9.3.1 开采试验的建站观测         | (125) |
| 9.3.2 条带开采地表移动盆地特征      | (126) |
| 9.3.3 地表移动变形的分布规律和最大值   | (126) |
| 9.4 曲线拟合法求取参数           | (128) |
| 9.4.1 曲线拟合的原理           | (128) |
| 9.4.2 用曲线拟合法求预计参数       | (130) |
| 9.5 移动角量参数特征的研究         | (131) |
| 9.5.1 厚松散层沉积年代对角量参数的影响  | (131) |
| 9.5.2 厚松散层性质对角量参数的影响    | (131) |
| 9.5.3 厚松散层岩层移动角量参数综合分析  | (132) |
| <b>10 条带开采实测资料分析</b>    | (133) |
| 10.1 永城矿区车集煤矿工程地质概况     | (133) |
| 10.2 开采方案选取与观测站建立       | (135) |
| 10.2.1 井上下情况            | (135) |
| 10.2.2 地表移动变形预计及建筑物损坏分析 | (135) |
| 10.2.3 开采方案             | (137) |
| 10.2.4 试采区的建站观测         | (138) |
| 10.3 厚松散层下条带开采实测资料分析    | (138) |
| 10.3.1 地表移动变形分布规律及最大值   | (138) |
| 10.3.2 概率积分法预计公式        | (139) |
| 10.3.3 传统概率积分法预计结果      | (140) |
| 10.4 修正模型预计             | (142) |
| 10.4.1 岩层移动边界角参数选取      | (142) |

|               |                              |              |
|---------------|------------------------------|--------------|
| 10.4.2        | 修正模型预计结果                     | (143)        |
| 10.5          | 厚松散层下条带开采预计参数分析              | (145)        |
| <b>11</b>     | <b>重复采动对地表移动的影响</b>          | <b>(149)</b> |
| 11.1          | 概况                           | (149)        |
| 11.1.1        | 重复采动岩层的“活化”机理                | (149)        |
| 11.1.2        | 重复采动地表移动参数宏观上的变化规律           | (150)        |
| 11.1.3        | 国内外重复采动的研究现状和存在的问题           | (150)        |
| 11.1.4        | 重复采动的研究方法                    | (151)        |
| 11.2          | 重复采动相似模拟试验研究                 | (152)        |
| 11.2.1        | 模型的设计                        | (152)        |
| 11.2.2        | 试验结果及分析                      | (155)        |
| 11.3          | 重复采动参数研究的灰色系统理论分析            | (167)        |
| 11.3.1        | 灰色系统理论                       | (167)        |
| 11.3.2        | 基于重复采动相似模拟试验的灰色预测            | (170)        |
| 11.3.3        | 灰色预测结果分析                     | (175)        |
| 11.3.4        | 灰色理论预计开采影响高度方法的不足及纠正思路       | (176)        |
| 11.3.5        | 基于重复采动相似模拟试验的灰色关联分析          | (177)        |
| 11.3.6        | 重复采动地表移动参数的灰色系统理论分析的结论<br>评述 | (179)        |
| <b>附录</b>     |                              | <b>(181)</b> |
| 附录 1          | 相似模型实验观测值(模型 1)              | (181)        |
| 附录 2          | 相似模型实验观测值(模型 2)              | (182)        |
| 附录 3          | 相似模型试验 I 初次采动岩层及地表移动实测数据表    | (183)        |
| 附录 4          | 相似模型试验 I 重复采动岩层及地表移动实测数据表    | (184)        |
| 附录 5          | 相似模型试验 II 初次采动岩层及地表移动实测数据表   | (185)        |
| 附录 6          | 相似模拟试验 II 重复采动岩层及地表移动实测数据表   | (186)        |
| 附录 7          | 相似模拟试验 III 初次采动岩层及地表移动实测数据表  | (187)        |
| 附录 8          | 相似模拟试验 III 重复采动岩层及地表移动实测数据表  | (188)        |
| <b>主要参考文献</b> |                              | <b>(189)</b> |

# 1 厚松散层的分布及特征

## 1.1 厚松散层的定义及分布

厚松散层是指第三系和第四系的含水土层,它是第三纪、第四纪以来所沉积成层、尚未固结硬化成岩的疏散沉积物,是坚硬岩石经过侵蚀、搬运和沉积等一系列地质作用和变化后形成的,其性质由于形成的时间、地点和环境的不同而有所差异。

对于松散层多厚可冠以“厚”,目前并没有一个确切的定义。根据我国大部分矿区的实际情况及一些专家学者的研究,认为:厚度超过 50 m 的表土层可以称做厚松散层;厚度超过 100 m 的表土层,就可以称做巨厚松散层<sup>[5,28,51,84,85,86,87,88]</sup>。

厚松散层在我国分布十分广泛,华东、华中、华北和东北地区均有分布,西北地区的厚松散层多是不饱和水的黏土层,都较为稳定。在地下工程施工中,较难处理的是深度超过 100 m 的含水土层,这些含水土层下蕴藏着丰富的矿产资源,也是地下工程的合适地点。例如,东北地区的沈北煤田、苏家屯煤田、鹤岗煤田、双鸭山煤田及内蒙古与吉林交界处的金宝屯煤田都覆盖着厚松散层,这些煤田的松散层厚度从几米到 200 m 不等。

华北地区的开滦煤田、邢台煤田均覆盖有厚松散层,开滦煤田的松散层厚度从 20 m 到 545 m 不等,一般厚度达 50 m 以上,自东北向西南逐步加深,该煤田松散层主要由砂、卵石、砾石组成,占总厚度的 50% 以上。邢台煤田的松散层厚度从 80 m 到 290 m 不等,西南方向薄,东北方向厚,其特点与开滦煤田的相似,但是黏土层的比例较高。

华东地区的淮南矿区、淮北矿区、兖州矿区(含济宁矿区)、徐州矿区、大屯矿区均覆盖有厚松散层。

华中地区的平顶山矿区、永夏矿区、焦作矿区也被不同厚度的松散层所覆盖。平顶山矿区的松散层自西向东厚度为 30 m 到 350 m,由含钙质结核的黏土、砂和砾石组成,砾石的厚度达 20 m 以上,黏土层累计厚度占总厚度的 50% 以上。永夏矿区的松散层从 100 m 到 380 m 不等。焦作矿区的松散层自西北

到东南厚度为 0 m 到 400 m, 由黄土、砂、泥和砾石组成, 主要含水层是砂和砾石层, 总厚度可达 60 m。

除矿山工程外, 城市市政工程和地下工程也常常会遇到厚松散层, 很多的大城市, 如北京、上海、天津和南京等地都覆盖有厚松散层。

## 1.2 厚松散层的成分

构成厚松散层沉积物的矿物颗粒的主要来源是岩石风化的产物, 但是其矿物成分不变, 主要还是构成岩石的那些“原生矿物”, 如石英、长石和云母等。岩石经过化学风化后, 其原生矿物都发生了变化, 形成“次生矿物”, 包括可溶和不可溶两类, 其中可溶的又分为易溶、中溶和难溶三种。常见的易溶次生矿物有岩盐、钾盐、芒硝、苏打, 中溶次生矿物有石膏, 难溶次生矿物有方解石、白云石等; 不可溶次生矿物多是原生矿物经过溶滤后的次生变质物, 颗粒非常小, 是构成黏土颗粒的主要成分, 又称“黏土矿物”。

松散沉积层是高度分散、富含孔隙的三相体系, 固体颗粒间有一定的孔隙, 颗粒与颗粒间的接触是点接触, 其中有许多孔隙充满着水和空气。处于塑性状态的黏土, 其颗粒之间不是直接接触, 而是通过水化膜接触。因此, 松散沉积物物质颗粒间连接强度很弱, 沙土基本上没有连接, 黏性土则是水胶连接。

(1) 砾石类。具有孔隙大、透水性强、压缩性低、抗剪强度大的特性。这些特征与颗粒的含量和孔隙中充填物的性质和数量有关, 典型的流水沉积的砾石分选性好, 孔隙中充填少量的砂粒, 透水性强, 压缩性最低, 抗剪强度最大; 基岩风化碎石和山坡堆积碎石分选性较差, 孔隙中充填大量的砂粒和粉粒等细粒小颗粒, 透水性相对较弱, 内摩擦角较小, 抗剪强度低, 压缩性稍大。

(2) 沙土类。没有连接, 呈现单粒构造和伪层状构造, 透水性强, 压缩性低, 压缩速度快, 内摩擦角较大, 抗剪强度较高。这些特征与砂粒的大小及密度有关, 粒径大, 则上述特征明显。

(3) 黏土类。黏土中黏粒含量较多, 常含亲水性强的黏土矿物, 具有水胶连接和团聚结构, 有时有结晶连接, 孔隙微小而多, 常因含水量不同而呈现固态、塑态和流态等不同稠度状态。压缩速度小而压缩量大, 抗剪强度主要取决于凝聚力、内摩擦角小。黏土的力学性质主要取决于其连接类型和密实度, 即与其黏粒含量、稠度、孔隙比有关。常因黏粒含量的不同, 黏性土的塑性、胀缩性、透水性、压缩性和抗剪强度等都有明显的变化。从亚沙土到黏土, 其塑性指数、胀缩量 and 凝聚力越大, 而渗透系数和内摩擦角越小。

(4) 黄土。黄土是特殊的陆相疏松堆积物, 以粉粒为主, 富含碳酸钙, 大孔

隙及其垂直节理发育,被水浸湿后在自重作用下会显著沉陷(湿陷性),具有非均质的骨架式海绵结构。原生黄土层理极不明显,次生黄土有层理;塑性较弱,一般无膨胀性,崩解性很强,透水性中等;在干燥状态下,压缩量中等,抗剪强度较高。但是随着湿度的增高,次生黄土的压缩性急剧增大,抗剪强度明显降低。

另外,还有淤泥土和膨胀土。

可以认识到厚松散层确实有其独特的性质:砂、砂层具有松散性与半流动性、高孔隙度、颗粒相似性;含水量高的黏土容易发生塑性变形;固结程度高的黏土容易产生节理和裂隙;黄土层具有湿陷性、垂直节理<sup>[26]</sup>。

松散层的成分及其独特的力学性质是厚松散层矿区地表沉陷的内在因素。

### 1.3 厚松散层结构、水文地质和工程地质特征

松散层的土体结构、水文地质和工程地质特征是进行厚松散层下条带开采土体沉陷变形机理分析的基础。

#### 1.3.1 厚松散层工程地质层组的划分

厚松散土层划分的目的是通过层组划分将复杂的土层简化为几个层组,使人们对每个层组的宏观工程地质性质有个清楚的了解。层组划分一般是在土层结构比较复杂时才应用。于双忠、吴恒等将层组定义为工程地质性质相近的松散土层的组合,并且从宏观上将松散层划分为七个层组,即黏土层组、膨胀层组、砂砾层组、流沙层组、淤泥层组、黄土层组和人工堆积层组。并将岩体工程地质力学的观点扩展到土体工程地质特性研究中,提出地层组合模型的概念。以土体中不同介质的界面为结构面,将松散层土体根据各个介质层的工程地质性状进行组合,由此构成土体结构模型,它可以揭示土体的成因和形成环境。

厚松散层的工程地质层组的划分可以考虑以下因素,即松散土层的形成时代和层序、土层的成因类型、土层的物质类型及其结构构造、土层的成层条件和厚度变化、土体的物理力学性质和土层的水文地质特征等。

#### 1.3.2 厚松散层土体结构特征

厚松散层的土体结构特征是指工程地质层组的土层柱状(剖面)和平面上的组合特征。每一个工程地质层组的性质由其起主导作用的工程地质类型的性质决定,可以将起主导作用的工程地质类型以其物质成分为主分为两类:以黏性土为主的层组和以粗粒土(沙土、砾砂和砂砾)为主的层组。黏土层组一般构成相对隔水层;砂砾层组一般构成含水层或透水层。垂向上单一结构的土体一般只见于薄表土层;厚松散层地区垂向结构一般是以黏性土为主的层组和粗粒土为主的层组交互沉积的多层复合结构,从水文地质角度考虑则是含水层、隔水层交

互沉积的多层复合结构。

### 1.3.3 土体结构对孔隙水压力分布和沉积的影响

厚松散层中透水性好的砂类土和透水性差的黏性土交互沉积,超静孔隙水压力在砂层中迅速消散,砂层和黏土层的交界面成为黏性土层孔隙水压力消散的界面。这种界面在厚松散层土体中可以出现在层状黏土层和砂层的交界面、相变的接触面、砂层及其黏土层尖面、分叉的交界面等处。

模拟试验结果表明,在土体沉陷过程中,以及在黏性土的超静孔隙水压力的积聚和消散中,厚松散层中交互沉积的砂层起着非常重要的作用。排水性越好,黏土层的固结沉降量越大,沉降达到稳定的时间越早;排水条件好,压缩性小的砂层存在于压缩性大的黏土层之间,这种交互沉积结构是造成厚松散层地下开采地表下沉系数大于1的重要原因和条件。

### 1.3.4 水位下降对超静孔隙水压力及地面沉陷的影响

大量水文地质观测资料表明,厚松散层地面受采动影响一般是厚松散层底部含水层或其下部的基岩含水层的水位发生下降所致。含水层本身的性质、采动导致水裂隙带的高度和采空区的尺寸对水位下降的幅度和范围影响是不同的。水位下降导致地面沉降基本上有三种情况,即水位大面积的均匀下降、水位疏干型下降和水位在采空区边界处呈抽水型下降。

单纯由水位下降造成的地面沉降与由超静孔隙水压力消散形成的地面沉降在土层剖面上的表现不同。水位下降引起的地面沉降主要表现在底部黏土层的压缩上,其上部的土层均匀下沉或有膨胀;开采沉陷造成的超静孔隙水压力消散形成的沉降在各层黏土层中都会引起变形,虽然每一层的变形值不大,但是变形的累计很可观。这些现象在两淮矿区的观测中都有显现。

所以,厚松散层地表沉降不一定是由单一因素造成的,可以是底部含水层水位的下降和超静孔隙水压力消散造成的水体耦合的双重作用。底部含水层水位下降造成的地表下沉主要取决于地表土层的性质,如厚度、分布和物理力学性质等;超静孔隙水压力消散形成的沉降和整个松散层的性质有关。

## 1.4 厚松散层的土体应力—应变分析

厚松散层在煤系地层中占的比例较大,由于一般的地基工程、市政工程等涉及不到这些土层的深部,对厚松散层的研究方法又有别于浅部土,因此必须引入土力学的一个分支,即深土力学。

土体变形受土体的种类、结构等因素的影响,其变形规律十分复杂,因此必须从其主要特征出发来建立模型,并采取合适的试验方法对其进行研究。

### 1.4.1 土体的非线性和非弹性

岩石和混凝土等坚硬材料应力—应变关系如图 1-1(a) 所示。初始阶段是直线, 坚硬材料处于弹性变形状态。当应力达到了某一临界值时, 应力—应变关系转为曲线, 坚硬材料同时存在弹性变形和塑性变形。土体也存在类似的特性, 图 1-1(b) 是土的三轴试验得出的轴向应力  $\sigma_1 - \sigma_3$  和轴向应变  $\epsilon_a$  之间的关系曲线。与岩石等坚硬材料不同, 初始的直线阶段很短, 对于松砂和正常固结黏土, 几乎没有直线阶段, 加载一开始就呈非线性。土体的非线性变形特性比其他材料明显得多。

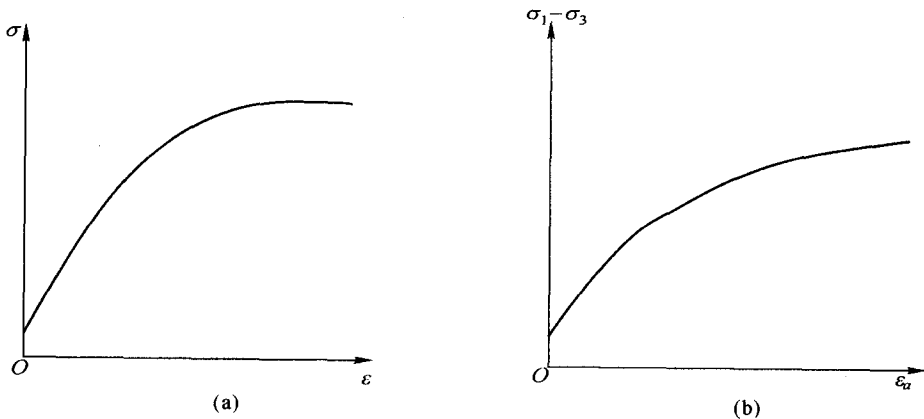


图 1-1 材料的应力—应变关系

这种非线性变化的产生, 就是因为除了弹性变形外还出现了不可恢复的塑性变形。土体是松散介质, 受力后颗粒之间的位置调整在荷载卸除后不能恢复, 形成较大的塑性变形。如果加载到某一应力后再卸载, 曲线则如图 1-2 所示。OA 段是加载段, AB 段是卸载段。

经过一个加载循环后, 再加载, 则从 B 点开始不与 AB 重合, 而存在一个环, 即回滞环, 如图 1-2 所示。回滞环的存在表示退载再加载过程中有能量消耗, 要给以能量补充。再加载还会产生新的不可恢复的变形, 不过同一荷载多次重复后塑性变形逐渐减小。

非线性和非弹性是土体变形的突出特点。

### 1.4.2 土体塑性体积应变和剪胀性

土体受力后会有明显的塑性体积变形, 如图 1-3 所示。土样在三轴仪中逐渐施加各向相等的压力  $p$  后再卸除, 从所得的  $p$  和体积应变  $\epsilon_v$  之间的关系曲线中, 可见存在不可恢复的塑性体积应变, 而且它往往比弹性体应变更大。塑性变形是由于晶格之间的错动滑移造成的, 它只体现形状的改变, 不产生体积变