

深厚含水松散层 的工程特性 及其在矿区的应用

■ 许延春 耿德庸 官云章 徐法奎 著

煤炭工业出版社

国家自然



274(1

煤炭科学研究总院北京开采研究所

深厚含水松散层的工程特性 及其在矿区的应用

许延春 耿德庸 官云章 徐法奎 著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

深厚含水松散层的工程特性及其在矿区的应用/许延春等著. —北京: 煤炭工业出版社, 2003

ISBN 7-5020-2361-5

I. 深… II. 许… III. ①煤矿—矿井—水文地质
②煤矿—矿井—工程地质 N. TD163

中国版本图书馆CIP数据核字 (2003) 第089823号



煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居35号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 850mm×1168mm¹/₃₂ 印张 6³/₈

字数 160 千字 印数 1—1,000

2003 年 12 月第 1 版 2003 年 12 月第 1 次印刷

社内编号 5132 定价 16.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

前 言

黄淮地区地处黄河、淮河平原，普遍存在着深厚的新生界含水松散地层。黄淮地区也是我国十分重要的煤炭能源基地，分布有：淮南、淮北、大屯、徐州、枣庄和兖州等大型矿区，建有300多个井筒，年产煤量上亿吨。然而自1987年以来40余处深厚含水松散层的井筒先后发生了井壁破坏事故，不仅造成了巨大的经济损失，严重影响了矿井的正常生产，而且引发了严重的安全隐患。研究表明，松散层疏水压缩、沉降是导致井壁破坏的主要原因。矿区松散层疏水变形沉降相比城市地表沉降有以下特点：①在矿区主要是底部松散含水层的水向矿井泄漏，导致全松散层的变形、沉降；而在城市主要取水地层是浅、中部含水层。②井筒破坏发生在深厚松散层（厚度大于100m），涉及的主要是深部松散层的硬土；市政建设和水利设施主要是在浅部（小于50m）软土层。③受影响构筑物（井筒）贯穿整个松散层；城市建筑物主要涉及地表和浅部土层。因此，深厚松散含水层对结构物的影响研究是近年来岩土力学领域的主要研究内容之一。

本书共分为9章。第1章介绍了研究范围及国内外开展相关内容的研究背景。第2、3章根据多个矿区土工试验结果，对深厚松散层的工程特性提出深部粘土可固结厚度的概念。提出深部粘土“上、下限强度”的概念和选取方法。通过设计的“粘土高压入渗”专门试验证明深部粘土与承压含水层接触面附近可形成强度弱面；含水层水压越高则可压缩范围就越大；证明下限强度可按有效应力相等、物性类似的浅部粘土强度值选取。第4章分析了黄淮地层深厚含水松散层的结构特征以及矿井疏水对松散含水层水位的影响，提出了松散层结构区域上的类似性和局部上的多变性。第5章根据兴隆庄矿和临涣矿区的观测结果，研究了松散层竖向

压缩变形特征,建立了计算模型。第6章研究了首次观测认识到深厚松散层存在集中水平移动现象,研究表明集中水平移动发生在深部厚层粘土与砂土的交界面处。第7章应用开发的专用软件,对地层压缩导致井壁附加应力的产生,采用卸压槽、套壁和地层注浆等措施防治井壁破坏进行了模拟计算分析,得出地层注浆措施的优选方案。第8章分析了井筒卸压槽应力、变形与松散层变形的关系;根据建筑物已有裂缝调查和不扩展观测结果,提出松散层压缩变形对工业场地内的建筑物不会造成损坏影响的认识。第9章应用观测和研究结果制定了兴隆庄矿西风井二次破坏治理工程方案。

本书作者许延春自1988年开始涉足矿区松散层的变形及其对井筒破坏影响的现场实测与理论研究,10多年来做了大量的现场观测、理论和试验研究。许延春先后在攻读硕士研究生和博士研究生期间开展该方面的研究,在研究过程中得到硕士研究生导师耿德庸研究员,博士研究生导师张玉卓研究员和耿德庸研究员, **刘天泉**院士的精心指导,在此表示衷心的感谢。本书在其博士学位论文的基础上,综合近年取得的科研成果的部分内容而成。

国家自然科学基金资助项目有:深部饱和粘土的性质与变形特征(编号:50274042,申请者:许延春),采矿影响下厚含水松散层的变形特征研究(编号59674006,申请者:耿德庸),采煤和地下水疏降共同作用下地表沉陷预测与控制(编号59974013,申请者:张玉卓)。

煤炭科学基金资助项目:厚含水层疏降固结对井壁影响与对策研究,淮北矿区巨厚松散地层内部非采动沉降变形规律及机理研究。

耿德庸、官云章、徐法奎同志主持或参加了部分研究工作,并且参加编写第5、6、8章。感谢同仁申宝宏、文学宽和刘秀娥等同志为本书获得大量宝贵的实测资料所做的努力。感谢煤炭科学研究总院北京开采研究所的领导和特殊采煤研究室全体同仁给予的热情帮助。感谢清华大学介玉新副教授,陈平、刘正硕士研究生

在数值分析方面提供的帮助。感谢兖州矿业集团公司黄福昌、葛洪章、倪兴华、席京德、李正龙等同志，淮北矿业集团公司黄定华、喻怀君、马嘉荣等同志的帮助。书中引用了一些单位和个人发表的文献资料，在此对其作者表示由衷的谢意。

内 容 提 要

本书根据大量的土工试验以及设计并实施的专门试验结果,对深厚饱和松散层的工程特性进行了深入的研究,提出了深厚松散层“可固结厚度”、“深部土强度的上、下限取值法”。根据现场实测结果,着重论述了在矿井工业场地由于疏水引起松散层竖向压缩变形的规律。分析了首次观测到的矿井工业场地深部土集中水平移动现象,研究了其机理和出现的位置。利用专用有限元软件,对松散层压缩变形导致井壁破坏的机理以及对卸压槽、套壁和地层注浆防治措施进行了数值模拟分析,提出了优化方案。研究了松散层变形与卸压槽应力、变形关系以及对建筑物的裂缝扩展的影响。书中还以兴隆庄矿西风井为例,应用研究成果制定了井筒破坏的二次治理方案。

本书可供采矿、建井、地质、岩土工程及市政建设等领域的生产、科研、设计、教学人员及研究生参考。

目 录

1 研究现状与研究内容	1
1.1 矿区疏水引起深厚含水松散层变形及井筒破坏的研究现状	2
1.1.1 采矿对深厚含水松散层变形的影响	2
1.1.2 矿区疏水引起深厚含水松散层变形与井壁破坏的情况	3
1.1.3 井壁破坏的治理措施和类型	10
1.1.4 国内相关研究现状	12
1.1.5 主要观测、试验手段	16
1.1.6 国外研究情况	17
1.2 城市疏水引起地表沉降的研究现状	18
1.2.1 疏水引起城市地表沉降概况	18
1.2.2 地层固结和地表沉降计算模型的研究	20
1.3 主要研究思路和内容	21
1.3.1 问题的提出	21
1.3.2 研究思路	23
1.3.3 主要研究内容	23
2 深部土的工程特性	26
2.1 饱和粘土性质的一些基本概念	26
2.2 华东矿区典型矿井土的性质	27
2.2.1 兴隆庄矿土的性质	27
2.2.2 海孜矿土的性质	29
2.3 深厚饱和粘土的物理特性	35

2.3.1	粘土的物理状态	35
2.3.2	粘土的密度	42
2.4	深部土层的矿物成分及粒度组成	44
2.4.1	粘土的矿物成分特征	44
2.4.2	含水层砂土的粒度成分	44
2.5	本章小结	44
3	深部粘土的力学特性	51
3.1	埋深对粘土力学性质的影响	51
3.2	粘土湿度与强度的关系	54
3.2.1	液性指数与强度的关系	54
3.2.2	液性指数对深部粘土力学性质的影响	54
3.2.3	粘土固结曲线的变化特征	57
3.2.4	深部粘土强度的“上、下限取值法”	58
3.3	深部粘土力学特性的专门试验研究	59
3.3.1	粘土高压入渗试验	59
3.3.2	深部原状粘土高压入渗试验的方法和 结果	60
3.3.3	试验结果分析	64
3.4	深部砂土三轴试验	66
3.5	本章小结	69
4	黄淮地区深厚松散层水文地质特征及其 受采矿的影响	71
4.1	黄淮地区深厚松散层结构特征	71
4.1.1	岩性的多层复合结构	71
4.1.2	岩性的平面分布特征	74
4.2	采矿对松散含水层地下水动态的影响	75
4.2.1	水体类型及其水动态	75
4.2.2	地层的水文地质结构类型分析	77

4.3	采矿对松散层水体的波及形式及工程影响	79
4.3.1	采矿对松散层水体的波及形式	79
4.3.2	对某些工程现象的解释	80
4.4	本章小结	80
5	松散层竖向变形特征及分析	81
5.1	兴隆庄地层压缩变形特征	81
5.1.1	累计压缩变形的观测结果及分析	81
5.1.2	各层位变形速率	84
5.2	地层压缩变形计算模型	87
5.2.1	时间因素模型	87
5.2.2	水位降因素模型	89
5.2.3	地层压缩率计算模型	91
5.3	临涣矿区松散层变形特征	92
5.3.1	地层结构性质与水动态	92
5.3.2	松散层沉降、变形特征	95
5.4	关于深部粘土层固结压缩范围的分析	101
5.5	本章小结	102
6	松散层水平移动观测与分析	104
6.1	水平移动观测方法	104
6.2	地层水平移动	106
6.2.1	深厚松散层水平移动特征	106
6.2.2	松散层深部出现集中水平移动	108
6.3	松散地层相对水平移动	109
6.3.1	主副井地层相对水平移动	109
6.3.2	东风井地层相对水平移动	110
6.4	松散层水平移动的机理分析	112
6.5	本章小结	113

7 松散层变形对井筒影响的数值模拟分析	114
7.1 松散层固结对井筒影响数值模拟的背景	114
7.2 数值模拟理论和模型介绍	116
7.2.1 计算选用的本构模型	116
7.2.2 数学模型和计算方案	121
7.3 周年级计算结果及分析	126
7.3.1 周年级计算地层、井壁压缩	126
7.3.2 周年级计算地层、井壁应力	129
7.4 季度级计算结果及分析	133
7.4.1 季度级地层、井壁变形	133
7.4.2 季度级井壁的应力变化	137
7.5 地层注浆对井壁影响分析	138
7.5.1 地层注浆对井壁影响的计算方案	138
7.5.2 地层注浆对井壁应力的影响	139
7.5.3 地层水平移动	145
7.6 地层的弯曲	149
7.7 套壁治理措施的理论分析	152
7.7.1 套壁治理措施的计算方案	152
7.7.2 套壁段高度对治理效果的影响分析	153
7.7.3 套壁材料硬度对井壁应力的影响	156
7.7.4 原井壁开卸压槽或破坏后套壁	157
7.7.5 套壁与壁后注浆联合使用	159
7.8 本章小结	159
8 地层变形对建筑物的影响	162
8.1 井壁卸压槽应力、变形与地层变形的关系	162
8.1.1 井壁卸压槽应力、变形观测站	162
8.1.2 卸压槽应力、变形与地层变形关系	163
8.2 主、副井井塔地基沉降	167

8.3	建筑物裂缝观测及分析	168
8.3.1	建筑物裂缝观测站布置	168
8.3.2	建筑物裂缝观测结果及分析	169
8.4	本章小结	170
9	工程应用实例——兴隆庄矿西风井二次治理工程	172
9.1	井筒破坏与治理情况	172
9.1.1	井壁第一次破坏和治理概况	172
9.1.2	井壁再次破坏情况	174
9.1.3	第一次治理工程的不足之处	175
9.2	应用研究成果改进二次治理方案	176
9.2.1	确定卸压槽位置	176
9.2.2	未在二隔井壁段增设卸压槽	176
9.2.3	根据观测成果预计地层变形	177
9.2.4	地层注浆设计	177
9.3	二次治理工程方案	178
9.3.1	工程方案的内容	178
9.3.2	经济对比分析	180
9.3.3	推荐治理方案	180
	参考文献	183

黄淮地区地处黄河、淮河平原，普遍存在着深厚的新生界含水松散地层。黄淮地区也是我国十分重要的煤炭能源基地，分布有：淮南、淮北、大屯、徐州、枣庄和兖州等大型矿区，建有300多个井筒，年产煤量上亿吨。然而自1987年以来40余处深厚含水松散层的井筒先后发生了井壁破坏事故，不仅造成了巨大的经济损失，严重影响了正常生产，而且引发了严重的安全隐患。自此，有关企业、科研机构 and 高校开展了针对井筒破坏机理与治理的科技攻关研究。研究发现矿井疏水引起深厚含水松散层的压缩、沉降，导致井壁内产生附加压应力，是造成井壁破坏的主要因素。矿区深厚松散层疏水变形、沉降与目前广泛存在的抽水引起城市地表沉降相比有3个特点：①在矿区主要是底部松散含水层的水向矿井泄漏，导致全松散层的变形、沉降。而城市的主要取水地层是浅、中部含水层。②井筒破坏发生在深厚松散层（厚度大于100m），涉及的主要是深部松散层的硬土。市政建设和水利设施主要是在浅部（小于50m）软土层。③受影响构筑物（井筒）贯穿整个松散层。城市建筑物主要涉及地表和浅部土层。目前理论研究远未能满足实践的需要，一些被破坏井筒经过治理后，又出现了二次破坏。鉴于深厚含水松散层具有特殊的工程、力学特性，并且与井筒破坏、特殊采矿工程是密切相关的，因此十分有必要深入研究深厚含水松散层的工程性质以及所引起的工程问题。研究成果不仅可直接指导井筒破坏治理工程和相关采矿工程，有助于形成、完善深土力学学科，还有利于城市地表沉降的研究与治理。

1.1 矿区疏水引起深厚含水松散层变形及井筒破坏的研究现状

1.1.1 采矿对深厚含水松散层变形的影响^{[1]~[16]}

在我国华南、华中、华北、东北地区有许多矿区被深厚新生界含水松散层所覆盖,采矿活动对松散层变形造成一定的影响。20世纪80年代初,在淮北的刘桥一矿、朱仙庄矿等发现在深厚松散层和薄基岩柱的条件下,采空区地表下沉系数(充分采动条件下地表最大下沉量与采高之比)大于1,使采矿引起的地表沉降量大于正常值。分析认为除开采引起的地表沉降外,矿井开采造成松散含水层水位疏降,引起松散层压缩,也造成了地表沉降。两种原因引起的地表下沉之和大于煤层采高,出现了下沉系数大于1的现象。

在1987年井壁发生破坏以前,矿区主要在建筑物下、水体下采煤中涉及深厚含水松散层的性质与变形。在建筑物下采煤中,着重研究采矿后地表的移动、变形以及对地表建筑物的影响。认识到深厚松散层的地表移动有别于浅部松散层,自20世纪80年代末对华东煤矿区厚含水松散层的地表移动规律、参数和机理进行了研究。本文作者根据实测资料结合离散元模拟对松散层内部的移动、变形进行了研究,改进了以往对松散层按 45° 移动角留设保护煤柱的常规,提出分段留设和划分深厚松散层移动角的方法。在水体下采煤中,侧重研究松散层的含、隔水性以及对井下采矿的影响。20世纪90年代初以来,利用深厚松散层中粘土强度高、隔水性好、塑性强以及砂层含水层以静储量为主、补给弱的特点,先后在山东的柴里矿、河北的邢台矿和安徽的芦岭矿等进行了深厚含水松散层下留设防塌煤柱开采,即允许采矿形成的垮落带进入松散层。

综上所述,矿区松散层变形类型可以分为3种,即采动影响、疏水影响和混合影响。

(1) 采动影响。在我国东部大部分矿区,煤系地层为新生界

松散地层覆盖，当在其下方基岩中采矿后，基岩一般情况下会发生垮落、开裂和下沉。基岩上覆的松散层也随之沉降、变形，地表形成下沉盆地。这种直接由于采矿造成的松散层变形，称为采动影响的松散层变形。对这类变形以往主要研究地表沉降盆地的范围、形状以及对地表建筑物的影响，目前已经形成了比较成熟的理论和观测体系，在建筑物下采矿中得到广泛的应用。而对松散层内部变形的研究较少。

(2) 疏水影响。当采矿后采动裂缝直接或间接地波及至松散含水层，将地下水导入矿井以及矿区生产、生活的取水造成松散含水层水位下降，会导致松散层固结变形，称为疏水影响的松散层变形。总体上，其变形范围一般为松散含水层分布的整段区域；平面分布上，一般大于采动引起的松散层变形范围，在留设保护煤柱的矿井工业场地内也可存在。对这类变形主要研究松散层内部的变形以及对井筒等建（构）筑物的影响。目前这类研究是推动形成深土力学的动力，正在越来越受到重视。该类变形与城市地表变形的区别是：疏水含水层埋深大，全厚松散层变形、移动对贯穿整个松散层的地下构筑物均有影响。本文主要研究深部硬土特性、疏水引起的松散层变形规律以及对井筒、地表建筑物的影响。

(3) 混合影响。由于采矿疏降上部松散含水层，因此在开采形成的地表沉降盆地内，地表同时产生采动沉降和疏水沉降。前述采空区地表下沉系数大于1的情况，就属于采矿和疏水混合影响的结果。

1.1.2 矿区疏水引起深厚含水松散层变形与井壁破坏的情况^{[17]~[23]}

自从1987年淮北矿区的临涣、海孜和童亭等矿的井壁出现集中破坏以来，已经有40余个井筒出现了破坏事故，部分破坏井筒情况见表1-1。井筒破坏造成了巨大的经济损失，并且严重威胁了矿井的安全正常生产。

井壁破裂的共同现象是：井筒罐道纵向弯曲变形影响提升，甚

表 1-1

破坏井壁情况

Table 1-1

Failures of the shaft walls

序号	井筒名称	施工 方法	竣工时间/ 破坏时间 (年. 月. 日)	井筒内/ 外径/m	井壁厚度 内/外/mm	松散层厚 /m	破坏部位 /m	井筒破坏情况
1	兖州兴隆 庄西风井	冻结	1983/1995.10	5.5/7.4	550/400	189.5	172~178	混凝土成片脱落, 石料沿剥裂面剪 断, 裂缝呈水平环状, 剥裂厚度100~ 200mm, 横钢筋突出, 裂缝处有涌水, 水量 25m ³ /h
2	兖州兴隆 庄东风井	冻结	1977.5/1997.6.7	5.0/6.4	400/350	176.45	157~180	裂缝呈近水平环向分布, 局部混 凝土井壁片状脱落, 偶见钢筋外露, 裂 缝涌水, 水量 2.8m ³ /h
3	兖州杨村 矿北风井	冻结	1984.10/1997.2	4.5/5.9	350/350	173.4	56~179.6	水平环状开裂、混凝土脱落、内壁、 钢筋露出、有水涌出
4	杨村矿主 井	冻结	1983.8/1996.8	5.0/6.6	400/400	185.40	137~196	井壁水平脱落、钢筋外露, 涌水量 0.2m ³ /h
5	兖州鲍店 矿北风井	冻结	1986/1995.7	5.0/6.6	400/400	202.56	186m左右	井壁水平脱落、钢筋外露, 涌水量 1m ³ /h

续表

序号	井筒名称	施工方法	竣工时间/ 破坏时间 (年.月.日)	井筒内/ 外径/m	井壁厚度 内/外/mm	松散层厚 /m	破坏部位 /m	井筒破坏情况
6	兖州鲍店 矿主井	冻结	1979.3/1995.7.12	6.5/8.5	500/500	148.69	136~144	罐道弯曲,井壁环状开裂,多处出水
7	兖州鲍店 矿副井	冻结	1979.11/1995.6.5	8.0/10.2	550/550	148.60	126	罐道弯曲,井壁大片脱落
8	济宁横河 矿主井	冻结	1987.1.28/1993.6	4.5/5.9	350/350	149.61	122.1~139.1	西北部和北部井壁全部脱落,涌水量 $14\text{m}^3/\text{h}$,第二次和第三次基本在位置
9	济宁横河 矿副井	冻结	1987.6.15/1995.3	4.5/5.9	350/350	144.13	136~141	破坏带在1.5~2m之间,片状剥落(厚100~200mm)
10	济宁太平 矿主井		/1995.4	4.5/6.0	350/450	165	166	井壁脱落,涌水量 $10\text{m}^3/\text{h}$
11	淮北临涣 矿副井	冻结	1981.11.13/ 1987.7.12	7.2/9.8	800/500	239.17	237~245 239~241	井壁突发片状剥落(厚100~250mm)纵筋外露,向井内弯曲,多处渗水,水量 $1\text{m}^3/\text{h}$