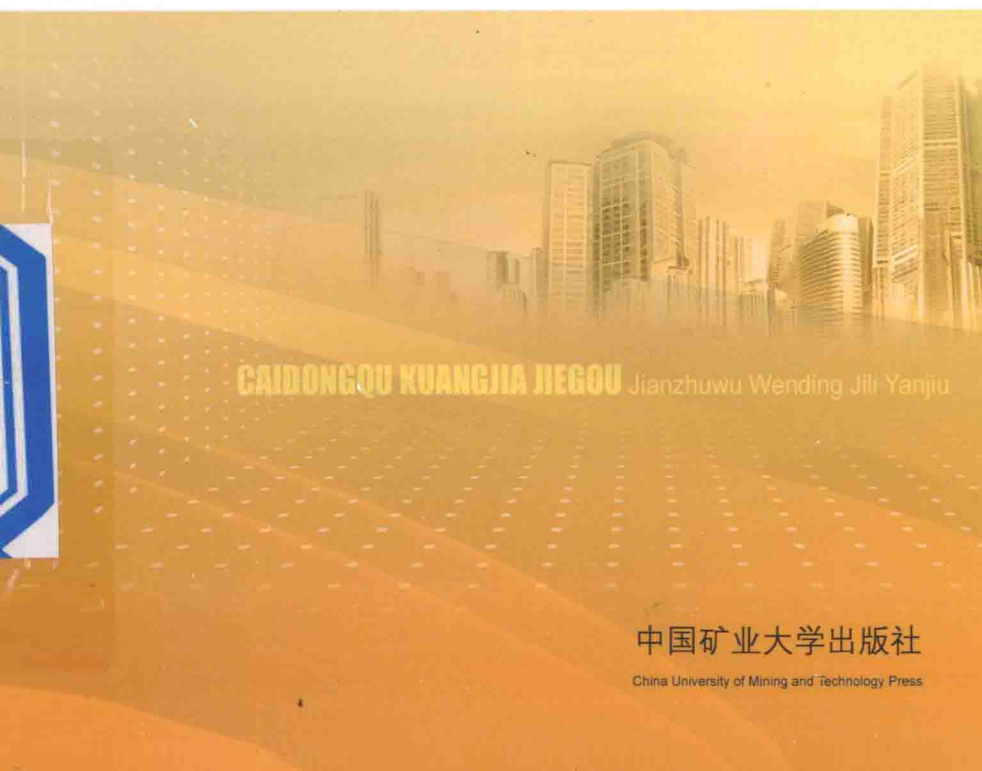


国家自然科学基金面上项目(51274192)资助

采动区框架结构 建筑物稳定机理研究

夏军武 著



CAIDONGQU KUANGJIA JIEGOU Jianzhuwu Wending Jili Yanjiu

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金面上项目(51274192)资助

采动区框架结构建筑物 稳定机理研究

夏军武 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书围绕采动区钢框架结构建筑物稳定的问题,建立了地基、基础、钢框架结构共同作用的力学模型,并应用该模型研究分析,得到了地下采煤工作面采动过程中钢框架结构建筑物的变形规律、内力变化规律及主要因素的影响规律。为研究采动区上方合理的钢框架结构形式、基础形式及建筑物抗变形能力提供了理论依据。通过扰动地基与基础界面力学试验、平面钢框架试验和钢框架结构三维有限元计算,研究了建筑物位于采动地表下沉盆地的不同位置、地基力学参数、基础形式、上部结构刚度和上部结构形式对钢框架结构建筑物稳定的影响规律;研究了钢框架结构建筑物的稳定机理,为采动区上方建筑物的设计、加固和控制地表变形的地下开采方法提供了理论依据。

本书可供从事矿山开采沉陷与治理、建筑工程等专业的科研、设计、工程技术人员以及高等院校教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

采动区框架结构建筑物稳定机理研究/夏军武著

—徐州:中国矿业大学出版社,2015.1

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2524 - 5

I. ①采… II. ①夏… III. ①采动区—框架结构—建筑物—稳定—研究 IV. ①TD212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 253779 号

书 名 采动区框架结构建筑物稳定机理研究

著 者 夏军武

责任编辑 陈红梅 钟 诚

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 850×1168 1/32 印张 6.875 字数 185 千字

版次印次 2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

作者简介

夏军武,女,1967年11月生,北京人。中国矿业大学力学与建筑工程学院教授、博士生导师、工学博士,国家一级注册结构工程师,国家注册监理工程师,入选教育部新世纪优秀人才,江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师,江苏省“333”高层次人才,中国矿业大学教学名师,中国矿业大学优秀青年学术带头人。

现任江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室主任,民盟中国矿业大学委员会常务副主委,民盟徐州市委委员,江苏省妇女代表大会执行委员,徐州市政协委员。

担任中国煤炭学会矿山地面建筑分会副主任,中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会理事会理事,中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会钢结构教学委员会委员,全国结构计算专业委员会委员,江苏省地震学会抗震工程专业委员会委员,江苏省建筑结构专业委员会委员。国家科学技术奖评审专家,国家发改委项目评审专家,全国优秀博士论文评审专家。2005年在英国 University of Birmingham,作为高级访问学者;2011年在美国 University of Kentucky 大学,作为国家留学基金委公派高级研究学者。

主要从事采动区建筑物保护、钢结构、钢与混凝土组合结构等方面的教学与科学研究工作。作为项目负责人主持完成和在研国家自然科学基金面上项目各1项;作为项目负责人主持完成教育部新世纪人才支持计划1项,并且完成企业委托的攻关项目30余项。作为主要研究人员完成国家“十一五”支撑计划重点项目2项,国家自然

科学基金项目 2 项。在国内外公开发表论文 80 余篇,被 SCI、EI 和 ISTP 收录 60 余篇;已授权发明专利 4 项,实用新型 16 项。荣获省部级科学技术进步二等奖 5 项,其中荣获中国煤炭工业科学技术二等奖 3 项,教育部高等学校科学技术进步二等奖 1 项和国家安全生产科技成果二等奖 1 项,荣获煤炭工业十大科技成果奖,荣获全国孙越崎青年科技奖。被民盟中央评为全国优秀盟员,被民盟徐州市委评为徐州市优秀盟员,政协提案荣获徐州市优秀提案。

讲授本科课程 4 门,研究生课程 4 门。多次荣获中国矿业大学优秀教学质量奖和优秀教学成果奖,荣获中国矿业大学精品课程 1 门;荣获江苏省优秀课程 1 门,江苏省精品课程 1 门;全国多媒体课件大赛三等奖 1 项,全国煤炭教育优秀成果三等奖 1 项,多年指导本科生参加江苏省力学创新竞赛、江苏省土木工程结构创新大赛并获多项大奖。指导研究生共 68 人,其中博士研究生 12 人,博士后 1 人;指导的研究生 5 人荣获中国矿业大学优秀硕士论文,3 人荣获江苏省优秀硕士论文。

DETAILED ABSTRACT

Focused on the interaction of ground-foundation-steel frame structure; the regularity of surface deformation caused by underground mining; the mechanical characteristics of disturbed ground base and concrete interface; the deformation resistance characteristics of steel structure and the additional internal force of ground-foundation-steel frame structure caused by mining-induced surface deformation; the mechanical model of supplementary deformation and finite element calculation etc., comprehensive methods such as finite element numerical calculation; field measurements; experiments in laboratory and theoretical analysis are applied in this paper to study the interaction of ground-foundation-steel frame structure in a mining subsidence area systematically. Main conclusions are obtained as follows;

(1) Mechanical model of ground-foundation-steel frame structure interaction in a mining subsidence area is established, and this model is used to analyze and study the mining-induced process of underground mining face; the different building location in sinking basin of a mining subsidence area; the additional internal force of ground-foundation-frame structure caused by mining-induced surface deformation. The changing law of supplementary deformation and the influencing regularity of main factors are obtained, which provides a theoretical basis for studying the surface limit deformation allowed by existing frame structure,

foundation pattern and rational frame structure above the a mining subsidence area.

(2) Combined with the existing standard of side-displacement limit of multilayer steel frame structure, the side-displacement limit value of steel frame structure is $H/200$. Through theoretical analysis and experimental research of the deformation characteristics and the internal force of the frame structure in a mining subsidence area, the limit value can reach $H/100$ in the process of mining.

(3) Along with advance of coal mining face, the buildings above a mining subsidence area should go through the compression zone, the inflection point zone and the tensile zone of mining-induced surface sinking basin in order of priority. As the buildings are located in areas of maximum positive curvature, inflection point or maximum negative curvature in mining-induced surface sinking basin, the additional internal force or the supplementary deformation of upper structure, foundation and ground base can reach the maximum value, it is a disadvantageous position.

(4) Interface deformations caused by surface deformation in a mining subsidence area include tangential deformation and normal deformation, and the damage surface occurs in soil inside close to the interface. The normal deformation and the normal force of soil are relevant to the soil property but not relevant to the characteristic state of interface. The friction force along the tangential direction caused by lower soil slip results in tangential deformation, and it is relevant to the friction coefficient and the normal force.

(5) Mining-induced surface deformation causes mainly increase in stress of bottom beam column and enlargement of side

displacement of frame structure. When being in elastic state of structure, the additional stress and supplementary deformation are directly proportional to the surface deformation suffered by frame structure.

(6) Pure frames and frames with support both have good deformation resistance capacities. The foundation rigidity of frame with support is increased to reduce the deformation and internal force of beam column in supporting plane obviously, and this support can effectively decrease the horizontal displacement of the frame and the horizontal shear force caused by the earthquake, that is, the frame structure with support possesses a better performance of earthquake resistance and deformation resistance.

(7) Impact of combined surface deformations in a mining subsidence area on the deformation and internal force of frame structure is bigger than the single deformation of the same deformation quantity. The influencing regularity of combined deformation on the steel frame structure is similar to that of the horizontal deformation, however, the influencing degree of combined deformation is greater. It indicates that horizontal deformation in combined deformations has a control effect on deformation and internal force of frame structure.

(8) Because the rigidity of strip foundation is larger than that of independent foundation, it can effectively decrease the impact of surface deformation on the upper structure, thus the extent of stress change of upper structure with strip foundation is smaller than the upper structure with independent foundation, the strip foundation should be properly adopted.

(9) Through analyzing combined regularities of surface movement and deformation in a mining subsidence area, the

mechanical properties of disturbed ground base and concrete interface; the impact of surface deformation in a mining subsidence area on deformation and internal force of steel frame structure as well as main influencing factors , the interaction mechanism of ground base-foundation-steel frame structure is studied , so as to provide a theoretical basis for reinforcement , designing of buildings above a mining subsidence area and underground mining methods to control the surface deformation.

序

随着我国国民经济的迅速发展,对能源的需求也将持续增长。煤炭作为我国的主要能源,其需求量逐年上升,这样新矿区将不断兴建,老矿区挖潜改造,而矿区地面建筑物也会大量兴建。为有利生产、方便生活,往往将建筑物建在煤层上方,建筑物下压煤量越来越大,据 20 世纪末不完全统计,我国建筑物压煤量已达 78.18 亿吨,大量煤炭丢弃在地下,造成资源浪费。采取特殊开采技术保护地面建筑物是解决日益突出的地下煤炭开采与保护地面建筑物矛盾的重要技术途径。但采用特殊开采技术,将使生产工艺复杂、降低生产效率、增加采煤成本;条带开采将使部分煤炭被丢弃;充填开采不仅增加基建投资,又需要大量充填材料,而我国大多数矿区充填材料匮乏,不能满足需要。

采用抗采动变形建筑技术,既可以采出建筑物下煤炭资源,充分利用采煤塌陷区的土地资源,又可以保护矿区地面环境和建筑物的安全正常使用,是解决建筑物下压煤开采时一条符合国情的技术途径,具有显著的社会和经济效益。因此,加强煤矿采动区建筑物抗变形理论与技术的研究,已成为煤矿采动损害的防治和建筑工程领域的研究热点,并已逐步得到煤炭行业和煤矿城市的广泛关注与重视。

煤矿采动区建筑物抗变形研究是涉及采矿、测量、力学、建筑工程等多学科交叉的研究领域。我国在砖混结构建筑物的损害与保护方面已取得了诸多重大研究成果;抗采动变形砖混结构建筑物的研究与推广也取得了重要进展和突破;框架结构抗采动变形理论与技术研究已经起步,并取得一些研究成果。目前,应对各种结构建筑物的采动损害机理,抗采动地基、基础与上部结构的共同作用,地表

变形组合与建筑荷载的叠加效应对建筑物的影响规律及其计算方法,以及不同结构建筑物的抗变形技术等方面还需要深入研究,使抗变形理论和技术不断完善。

本书采用理论分析、物理模拟试验、现场测试与有限元数值计算等方法,围绕煤矿采动区钢框架结构建筑物稳定机理,系统地研究了采动区地表组合变形条件下扰动地基土与混凝土基础界面的力学特性,建立了采动地基、基础与框架结构共同作用的有限元计算模型,分析得到了采动区地表组合变形与建筑物荷载叠加效应及其对框架结构的内力与变形的影响规律,提出了采动区合理的钢框架结构形式和基础形式以及钢框架结构允许的地表变形值的确定方法,为采动区钢框架结构建筑物的设计与加固提供了理论依据。

本书作者十多年来潜心研究矿山采动区建筑物的稳定机理、建筑物抗采动变形理论与技术,先后承担了多项国家自然科学基金项目,教育部新世纪人才支持项目,国家“十二五”科技支撑计划,煤矿企业的科研项目,取得了一系列研究成果,丰富了煤矿采动区建筑物损坏机理与保护的研究内涵,在建筑物抗采动变形的理论研究与工程应用上取得了很大的成绩。本专著的出版将促进建筑物抗采动变形理论与技术的学术交流与提高,推动矿山采动区建筑物保护研究的深入开展。

研究员、博士生导师

崔继宪

目 录

1 绪论	1
1.1 地表变形对建筑物影响规律的研究现状	2
1.2 地基土与结构界面的研究现状	5
1.2.1 地基土与结构界面模型的研究	6
1.2.2 地基与基础界面性状的试验研究	8
1.3 地基、基础、上部结构共同作用的研究现状	12
1.3.1 常规地基、基础、上部结构共同作用的研究	12
1.3.2 采动区地基、基础、上部结构共同作用的研究	13
1.4 采动区建筑物抗变形的保护措施研究现状	15
1.5 钢结构抗震和抗变形性能的研究现状	17
2 采动区地表移动变形规律	20
2.1 地下开采对建筑物的影响	21
2.2 采动区地表变形规律	23
2.2.1 地表下沉规律	23
2.2.2 地表倾斜规律	25
2.2.3 地表曲率变形规律	26
2.2.4 地表水平变形与水平移动规律	27
2.2.5 采动区地表组合变形规律	28
2.3 采动区地表动态变形规律数值分析	30
2.3.1 现场开采条件	30
2.3.2 地表动态移动变形规律	31

3	采动区地基与基础界面特性的研究	36
3.1	非扰动土与混凝土界面剪切试验	36
3.1.1	非扰动土界面试验方案	36
3.1.2	非扰动土界面试验结果分析	38
3.2	扰动地基与混凝土界面试验	40
3.2.1	扰动地基与混凝土界面试验方案	40
3.2.2	扰动土界面试验结果分析	43
3.2.3	扰动土界面破坏机理分析	46
3.3	扰动地基计算模型的确定	47
3.3.1	常用地基模型简介	47
3.3.2	扰动地基模型的选择	50
3.3.3	Drucker-Prager 材料模型的特性	51
3.4	采动区地基土及界面现场试验研究	53
3.4.1	现场概况	53
3.4.2	界面的位置变化	53
3.4.3	采动区扰动土特性变化	54
3.4.4	扰动地基土现场试验	56
3.4.5	地基和界面计算模型的有效性	60
4	采动变形对平面钢框架结构影响规律的研究	65
4.1	平面钢框架受采动变形的模拟试验设计	66
4.1.1	模拟试验方案	66
4.1.2	试验测试与试验步骤	69
4.2	采动变形对平面钢框架影响规律的试验研究	71
4.2.1	不均匀沉降对平面钢框架的影响规律	71
4.2.2	水平变形对平面钢框架的影响规律	72
4.2.3	开采过程对平面钢框架的影响规律	74
4.3	采动变形对平面钢框架结构影响规律的有限元计算	79

4.3.1	有限元计算与试验对比·····	79
4.3.2	采动变形对多层框架的影响规律·····	79
4.4	采动变形影响平面钢框架结构的规律·····	91
5	采动区地基、基础、框架结构共同作用的理论分析·····	93
5.1	共同作用力学模型的建立·····	94
5.1.1	力学模型的建立·····	94
5.1.2	边界条件·····	98
5.2	共同作用微分方程求解·····	98
5.2.1	剪弯梁共同作用微分方程求解·····	98
5.2.2	剪切梁共同作用微分方程求解·····	100
5.3	框架结构变形及附加应力求解·····	102
5.3.1	采动区框架结构变形计算·····	102
5.3.2	采动区建筑物内力计算·····	103
5.4	框架结构动态变形规律及影响因素·····	106
5.5	地基、基础、框架结构附加内力动态变化规律 及影响因素·····	110
5.5.1	框架结构附加内力动态变化规律 及影响因素·····	111
5.5.2	基础梁附加剪力、弯矩动态变化规律 及影响因素·····	111
5.5.3	地基附加反力动态变化规律及影响因素·····	117
6	采动区地基、基础、空间钢框架结构共同作用研究·····	121
6.1	三维空间共同作用计算模型的建立·····	122
6.1.1	ANSYS 有限元软件简介·····	122
6.1.2	有限元空间模型的建立·····	123
6.2	采动区共同作用的主要影响因素·····	130
6.2.1	地基参数对共同作用的影响规律·····	130

6.2.2	上部结构刚度对共同作用的影响规律	137
6.2.3	基础刚度对共同作用的影响规律	142
6.3	地表变形对地基、基础和空间框架的影响规律	146
6.3.1	地表变形对基础和地基变形影响	146
6.3.2	地表变形对上部结构的影响	147
6.3.3	结构形式的抗变形特性	150
6.3.4	组合变形对共同作用的影响规律	151
6.3.5	组合变形与单一变形的比较	154
7	采动区多层钢框架结构抗变形设计建议	160
7.1	采动区建筑物布置原则	160
7.1.1	建筑物场地与地基土	160
7.1.2	建筑物平面布置	161
7.1.3	建筑物竖向布置	164
7.2	钢框架结构选型	166
7.2.1	结构选型	166
7.2.2	基础选型	167
7.3	钢框架结构分析	168
7.3.1	地表变形的作用效应	168
7.3.2	结构分析方法	170
7.4	钢框架结构的抗变形设计	170
7.4.1	侧向位移限值	170
7.4.2	建筑物抗采动变形措施	172
	参考文献	176
	附录 程序代码	189
	后记	202

1 绪论

随着煤炭工业的发展,煤炭产量逐年递增,开采范围越来越大,我国许多矿区的开采范围已延伸到密集的城镇、村庄下。据不完全统计,仅华东地区“三下”压煤就达 115.76 亿吨;同时,各种矿石、石油、地下水和天然气等地下资源的开采,地铁、隧道和地下建筑以及城市地下工程的兴建都可能引起地表移动变形,对建筑物造成严重的影响和破坏。因此,实现建筑物抗变形是建筑物下煤炭等地下资源安全开采的一条重要技术途径。

经济的发展、人口的增加与土地资源的匮乏形成了尖锐的矛盾。目前,我国及其他国家都存在着大量的地表变形区或者是潜在的地表变形区,如何更好地开发利用这类土地资源,已经成为一个亟待解决的问题。因此,在地表变形地区建造能抵抗一定程度地表变形的建筑物或构筑物已经成为研究的热点。

国内外保护采动区上方建筑物及桥梁一般使用的技术对策主要有:地下采用留设保护煤柱或条带不充分采动,地面采用建筑物迁移重建或桥梁道路改线建新等措施。如果采用留设保护煤柱或条带开采,将浪费大量的煤炭资源,而且巷道掘进工程量、采煤工作面搬家工作量等增大,生产效率低、生产成本显著提高。重新选址新建方案需占用土地资源、增加资金投入、影响生产与生活,并且建设周期长。在原址对原有建筑物进行保护是一种有效途径,但必须解决移动变形地基基础上的建筑物安全稳定问题。

以往的研究主要针对低层砖混结构^[1-5],取得了大量研究成果。近几年,随着采动(空)区大型工业厂房的建设,对钢筋混凝土结构^[6-9]和单层轻钢结构^[10,11]的研究也逐步深入。砖混结构以砖砌墙体为承重结构,重量大,抗震和抗变形性能差,而且黏土砖需从耕地里大量挖土,使我国本来就很缺乏的土地资源更加短缺,许多地区禁止或限制使用黏土砖,因此砖混结构的建筑物建造将减少。随着经济的发展,人们对建筑物的安全性要求越来越高,研究适应采动区大变形要求的新型结构体系,丰富抗变形结构体系和与之相适应的抗变形措施迫在眉睫。

钢结构建筑具有结构重量轻,适于系列化、标准化和工厂规模生产,产品成本低,建设周期短,有效使用面积大,抗震性能优于其他材料结构等优点。随着我国钢材产量的增加,国家制定了钢结构“十五”发展规划,要求积极发展钢结构。因此,研究采动区上方多层钢结构抗变形机理及抗震抗变形双重保护技术,将有效地解决采动区(采空区)建筑物受地表变形影响的技术难题,具有重大的社会意义和经济价值。

1.1 地表变形对建筑物影响规律的研究现状

地下开采所引起的岩层及地表移动是一个复杂的时间—空间现象,一般会形成地表下沉盆地,并使采动区的建筑物遭受严重的影响甚至破坏。要研究地表变形对建筑物的影响,必须掌握地下开采引起地表移动变形的规律。

我国开采沉陷工作者经过 60 年的努力,已经基本掌握了一般地质条件下开采引起的地表变形规律^[12],并建立了适合我国实际情况的多种预计方法^[12,13]。

地表变形对建筑物影响规律的研究是建立在掌握地表变形规律和变形预计的基础上的,主要研究了以下几种地表移动变形对建筑物的影响规律。