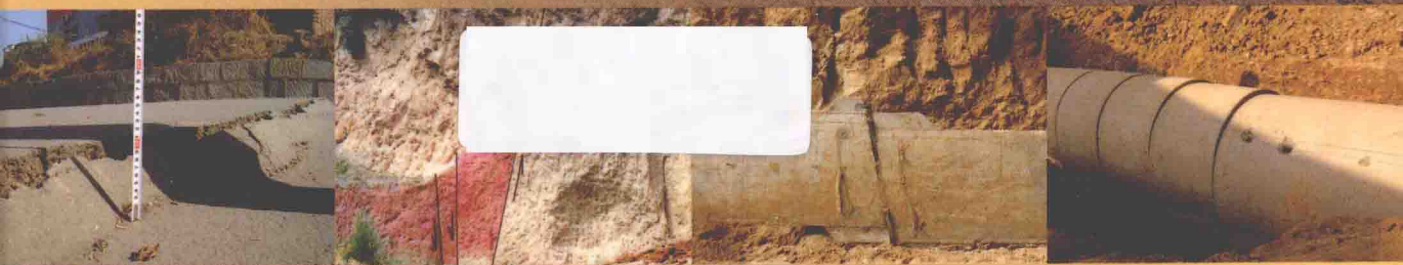




新世纪工程地质学丛书

西安地裂缝灾害

彭建兵 等 著



科学出版社

新世纪工程地质学丛书

西安地裂缝灾害

彭建兵 等 著

本书成果获得国家自然科学基金重点项目和面上项目、
国土资源大调查项目和国家西部交通建设科技项目资助



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书论述了西安地裂缝地面沉降形成的地质背景、发育分布规律和活动特征;通过各种勘探手段和岩土测试,揭示了西安地裂缝的平、剖面特征以及地裂缝两盘地层物理力学特性;基于 GPS 和 InSAR 技术开展了西安地裂缝地面沉降的监测及动态分析;从理论上论证了深部构造孕育地裂缝、基底构造萌生地裂缝、断裂活动伴生地裂缝、构造应力群发地裂缝、黄土介质响应地裂缝、抽水作用扩展地裂缝和表水渗透开启地裂缝的地裂缝耦合机理;对地裂缝造成的工程危害进行了分类,揭示了西安地裂缝工程灾害机理,突破了地铁工程地裂缝减灾的关键技术,提出了城市及地铁工程地裂缝减灾技术体系。

本书可供从事工程地质、水文地质、环境地质、城乡规划、土木工程、工程勘察与设计、防灾减灾与防护工程等领域的科研人员、技术人员、高校教师、研究生和大中专院校学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

西安地裂缝灾害/彭建兵等著. —北京:科学出版社,2012

(新世纪工程地质学丛书)

ISBN 978-7-03-034438-0

I. ①西… II. ①彭… III. ①地裂缝-研究-西安市 IV. ①P315.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 106658 号

责任编辑:彭胜潮 韩 鹏 / 责任校对:林青梅 钟 洋

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 2 月第一次印刷 印张:52 1/4

字数:1 210 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书主要作者

彭建兵	张勤	黄强兵	门玉明
李新生	王玮	孙渊	李斌
邓亚虹	孙党生	赵超英	李寻昌
王启耀	王利	胡志平	石玉玲
卢全中	蒋臻蔚	万伟峰	孙刚臣

《新世纪工程地质学丛书》 规划委员会

主 任：黄润秋

副主任：伍法权 殷跃平

成 员：施 斌 彭建兵 王 清 唐辉明 李广诚
化建新 武 威 丰明海 杨书涛 彭土标

序

地裂缝是人类社会发展中遇到的一个突出的自然灾害问题,也是一个地球科学中新的科学问题。西安地裂缝近东西向展布,有 14 条地裂缝横贯全城,分割着这块土地,严重地危害着工程建(构)筑物和城市人居安全,制约着土地有效利用和城市规划建设。因此查明其分布规律、破解其成因机理、把握其活动特征、寻找其减灾对策,成为地学界关注的一个重大地学工程问题。西安地裂缝出现已 50 多年,许多学者为此进行了大量研究,也已获得了一批重要的研究成果。其中,彭建兵教授领衔的学术团队历经 20 余年的持续研究,现经总结概括,终于推出了这部学术专著,这无疑会将西安地裂缝的研究推进到了一个新的层次。

地裂缝虽然是地球表面一种浅表层破裂现象,但却又是一种受多种复杂因素制约和影响的地质灾害现象。就地裂缝研究问题,我与彭建兵教授有过多次交谈,曾建议他们有关地裂缝的研究一定要注意从基础地质研究入手,以解决工程建设实际问题为目标。因为地裂缝既涉及地球深部构造,又涉及浅层构造与地表系统;既涉及岩土力学,又涉及物探测量;既涉及地质环境变化,又涉及人类工程活动;既涉及工程稳定,又涉及人居安全,是一个有待持续研究攻关的重大科学命题。可喜的是,围绕这一重大命题,彭建兵教授带领的课题组先后获得 1 项国家自然科学基金重点项目和 10 项面上与青年基金项目,多项国土资源大调查项目和国家西部交通建设科技项目,以及 20 余项工程科技项目的资助。他们以这些项目为依托,开展了大量的调查、勘探、监测、试验、模拟和分析计算工作,经持续探索研究,综合揭示与探索解答了西安地裂缝的分布、成因、活动及灾害机理的许多基本问题,不但为适应满足社会建设需求,同时也把我国地裂缝研究推进到了科学发展与应用的国际前沿。该书即是这些研究成果的综合集成。

该书是一部有关地裂缝的综合专著,既有理论总结概括,又是一部实践应用的指南,内容综合丰富,包含大量宝贵的科学资料、创新的学术观点和新颖的研究方法。地裂缝见之于地表,却与深部构造和区域构造相关联,作者提出的西安地区深部构造、基底构造、第四纪构造和现代地

壳变动等四个地质结构模型,不仅形象地勾画出了西安地区不同层次的地质结构面貌,而且还深刻地揭示了西安地裂缝的形成与盆地深、浅、表层构造的内在联系。自20世纪50年代西安首现地裂缝以来,地裂缝一直在扩展中,近几年彭建兵教授的学术团队先后又发现了 f_{14} 地裂缝和长安地裂缝,并发现西安地裂缝已东过泾河、西穿皂河、南到韦曲,大大超出了地下水超采范围,这些新发现为正确认识西安地裂缝的分布及成因奠定了新的重要基础。书中所展示的14条地裂缝带状展示图和地裂缝活动特征曲线图,以及有关地裂缝的几何学、运动学等数据成果,都是他们穿大街、钻小巷,开展各类调查、勘探和监测得出的。特别是他们在隐伏地裂缝精细探测和地面沉降地裂缝高精度监测方面还开创性地研发了一些新技术,不仅发现了西安地区第四纪土层中的破裂系统,而且还建立了西安地区1992年以来地面沉降地裂缝变化“基因谱”,从而为从本质上认识西安地裂缝的成因提供了重要依据,也大大提升了我国地裂缝探测与监测的技术水平。

西安地裂缝的成因历来争议较大,这是因为其形成背景、影响因素和力学机理十分复杂。该书提出了深部构造孕育地裂缝、盆地伸展萌生地裂缝、黄土介质响应地裂缝、断层活动伴生地裂缝、应力作用群发地裂缝、抽水作用加剧地裂缝、表水渗透重启地裂缝的发育机理与成因,在此基础上确认第四纪土层中的构造破裂面构成了西安地裂缝的“原型”,地下水和地表水的活动变化导致地裂缝超常活动、反复开启和显露地表,这是迄今为止比较综合系统、比较科学合理地探索、揭示了西安地裂缝的成因问题,这无疑也提升了我国地裂缝研究的理论水平。

地质科学研究只有适应满足国家重大需求和服务于国家工程建设才能更有生命力,这是地质学家的责任所在,这也是该书的一个突出特色。该书作者十分注重于城市和工程建设中的地裂缝减灾难题的攻关,他们发现了西安地裂缝工程危害的四种主要模式,提出了不同基础形式的建筑物最小避让距离和城市地裂缝减灾的综合方案,这些成果为西安城市规划建设、土地有效利用和工程建(构)筑物防灾减灾提供了重要技术支撑。特别令人欣慰的是,他们面对世界地铁建设史上从未遇到过的地裂缝减灾难题,在国际上率先开展了一系列大型物理模拟试验和数值分析计算,再现了地裂缝活动对地铁隧道变形破坏的过程及主要模式,并据此提出了地铁隧道适应地裂缝变形的几种结构措施,这些成果均已应用于西安地铁Ⅰ、Ⅱ号线的设计与施工中,并将指导着西安市其他地

铁线路的建设。不言而喻,他们为西安地铁建设作出了重要贡献。

我与该书主笔彭建兵教授相识已近 30 年,并一直在关注着他的科研工作与事业发展。他带领的长安大学地质灾害研究学术团队是一支活跃在我国工程地质和地质灾害学界的优秀团队,我为他们扎实认真的野外实践、充满活力的学术探索和富有开拓的创新研究精神而深感欣慰,并也为这支团队发展潜力能得到更好持续发挥而有更多的期待!据知,他们的地裂缝研究已由西安扩展至汾渭盆地,并由汾渭走向了华北乃至更大地域,我相信他们会不断推出新的重要学术成果,为我国工程地质学和灾害地质学的进步、为我国防灾减灾事业的发展作出更大的贡献。

应邀作序,以此祝贺研究成果专著出版。

中国科学院院士



2011 年 10 月于西安

前言

西安作为中国的重要城市,已有 3000 余年的建设历史;作为中国古代都城,也曾历时千余年。如今她既是我国西部地区政治、经济、文化中心之一,又是西部大开发的桥头堡。

然而,在数千年的历史发展长河中,祸福相依的现象一直困扰着这个城市。西安所在的渭河盆地是中国大陆典型的新生代裂陷盆地,其地质构造复杂,活断层发育,新构造运动强烈,地震、地裂、滑坡等多种地质灾害频发。早在 2000 多年前的《诗经》、《禹贡》、《山海经》、《水经注》、历代本纪以及明清以来的地方志等历史文献均记载了这一地区大量的有关地震、地裂及滑坡等灾害事件。

在西安市,最著名的地质灾害是地裂缝。自 1959 年在城南小寨西路 3 号院和城西南西北大学等地零星发现地裂缝以来,目前已发展成 14 条,分布面积约 250km^2 ,延伸总长度 160 余公里,地表出露长度 70 余公里,均呈 NEE 向横穿西安市区和郊区。地裂缝所到之处,楼房被撕裂,马路被错开,管道被切断,农田被毁坏,给西安市的工程建设、工农业生产和人民生活带来极大的危害,直接经济损失超过 50 亿元;同时它又严重地制约着西安城市规划、土地有效利用、地下水开采利用和城市地下空间开发利用,如正在建设的西安地下铁道因要多处横穿或斜穿地裂缝带,因而面临着世界地铁建设史上从未遇到过的地裂缝防治难题。

正是由于西安地裂缝地面沉降灾害的特殊性和威胁城市建设和人居安全的严重性,多年来,国家有关部门、省市地方政府和各勘察设计院、高等院校、科研院所等单位先后投入了大量人力和财力,开展过西安地裂缝地面沉降的勘察、监测、评价、形成机理及防治对策的研究工作。在这方面作出过重要贡献的单位主要有西安市地震局(1976~1981)、陕西师范大学(1976~1985)、陕西省地震局(1976~1995)、陕西省地质矿产局第一水文地质大队(1980~1990)、陕西省地质环境监测总站(1990~2007)、机械工业勘察院(1979~2007)、长安大学(包括原西安地质学院、西安工程学院)(1980~)。省外的中国地质大学(武汉)和成都理工大学曾与陕西地质环境监测总站合作开展过西安地面沉降成因机理的数学预测模型和物理模型研究工作;日本京都大学和东京都立大学曾与陕西地震局合作开展过“西安地裂与渭河盆地活断层”的研究(1987~1992),上述研究工作取得了一批重要科研成果。除此之外,在陕西的一些勘测设计单位,如中国有色工业西安勘察研究院、西北综合勘察研究院、机械工业勘察研究院、信息产业综合勘察研究院、陕西地震局地震工程勘察院、西安市测绘勘察院、长安大学工程勘察院、陕西工程勘察院、西安煤炭设计院、中国建筑西北设计研究院、陕西建筑勘测设计院等,完成了大量的西安地区工程建设场地的地裂缝勘察工作,积累了丰富的地裂缝勘察成果。

在近 30 年的西安地裂缝地面沉降研究工作中,一些学者作出过重要贡献,包括张天明(1980~)、王景明(1976~1995)、李永善、耿大玉(1987~1995)、林在贯(1978~2008)、吴嘉毅(1979~1990)、朱慕仁(1976~1984)、刘景文(1976~1985)、刘国昌(1979~1984)、

索传眉和阎文中(1990~2007)、杨凯文和吴成基(1976~1986)、彭建兵和李新生(1988~)等。其研究成果除了散见在各种学术期刊上的数百篇学术论文外,主要代表性学术成果包括张家明主编的《西安地裂缝研究》(1990)、王景明等著的《地裂缝及其灾害的理论与应用》(2000)、李永善等编著的《西安地裂及渭河盆地活断层研究》(1992)和《西安地裂缝》(1986)、吴嘉毅主编的《西安地裂缝工程地质性质》(1990)、杨凯元和吴成基主编的《西安地裂缝形变监测与研究》(1986)、彭建兵等著《渭河盆地活动断裂与地质灾害》(1992)等学术专著。此外,还有机械工业勘察研究院和中国建筑西北设计研究院主编的《西安地裂缝场地勘察与工程设计规程(试行)》1988年版和2006年修订版。上述研究成果对西安地裂缝地面沉降的研究工作起到了重要推动作用,也为我们课题组的研究工作提供了重要的参考资料。

本书是我们课题组历时20余年在西安地区开展地裂缝地面沉降研究成果的集成。我们的研究工作大致可分为三个阶段:

1988~1992年为起步研究阶段。这期间,我们主要协助刘国昌教授完成他所主持的国家自然科学基金项目“西安市环境地质研究”、陕西省科学技术委员会专项“渭河盆地活动断裂及其对工程建设危害研究”等两个课题,主要开展了渭河盆地活动断层的分布规律、活动特征及其与地质灾害发育关系等方面的研究,其中重点是西安地裂缝的研究。这阶段的研究成果主要反映在我们出版的《渭河盆地活动断裂与地质灾害》一书中。

1993~2003年为持续研究阶段。这期间,本项目课题组成员在西安地区承担了大量的工程场地地裂缝勘察、重大场地地震安全性评价和工程场地地质灾害危险性评估等项目。通过这些勘察评价工作,我们对西安地裂缝地面沉降灾害有了更进一步的了解和认识,掌握了大量的基础资料,但同时也发现了一些亟待解决的关键问题,因而萌生了申报国家专项科研项目的想法。

2004~2010年为关键研究阶段。自2004年起,在中国地质调查局和国家自然科学基金委员会的大力支持下,我们先后承担了国土资源大调查项目“汾渭盆地典型地区地裂缝地面沉降监测与防治”,国家自然科学基金重点项目“汾渭盆地地裂缝成因与大陆动力学”、国家自然科学基金面上项目“城市地裂缝InSAR监测的理论与应用研究”、“地裂缝活动环境下的地层——地铁隧道相互作用研究”、“断层错动不均匀分布与地面变形关系的研究”、“地裂缝对隧道管线衬砌结构的影响机理研究”和“宽幅InSAR与GPS融合研究汾渭盆地的综合形变”等,国家西部交通建设科技攻关项目“公路工程活断层、地裂缝灾害的精细探测、定量评价与防治对策研究”等国家科研项目。2005年,西安市开始启动西安地铁的建设工程,我们又先后承担完成了“西安地铁一号线地质灾害危险性评估”、“西安地铁二号线地裂缝勘察”、“西安地铁一号线可行性论证地裂缝勘察”和“西安地裂缝对地铁隧道的危害及结构措施研究”等项目。

在这一轮众多项目的实施中,我们确定拟重点解决和回答如下8个问题:

- (1) 地裂缝分布是否仅限于西安城区,向周围如何扩展;
- (2) 地裂缝是近地表的土层破裂系统,还是与下伏断层相连的构造破裂面;
- (3) 西安地区现今构造应力主要受周围哪个块体运动的影响,其应力活动怎样引起断层活动并如何引起地裂缝活动;

(4) 地裂缝的现今活动是构造变形的继续还是超采地下水加剧的;

(5) 西安地区超固结土的沉降机理与我国其他地区有什么不同,地面沉降与地裂缝有什么样的内在联系;

(6) 地裂缝地面沉降的现今活动状况如何,如何有效地监测其活动并把握未来活动趋势;

(7) 地裂缝对各类工程建(构)筑物产生什么样的破坏,尤其是对地铁隧道可能产生什么样的危害,如何控制和减轻这类灾害;

(8) 如何做到既能控制地面沉降地裂缝,又能有效合理地开采利用城市地下水资源。

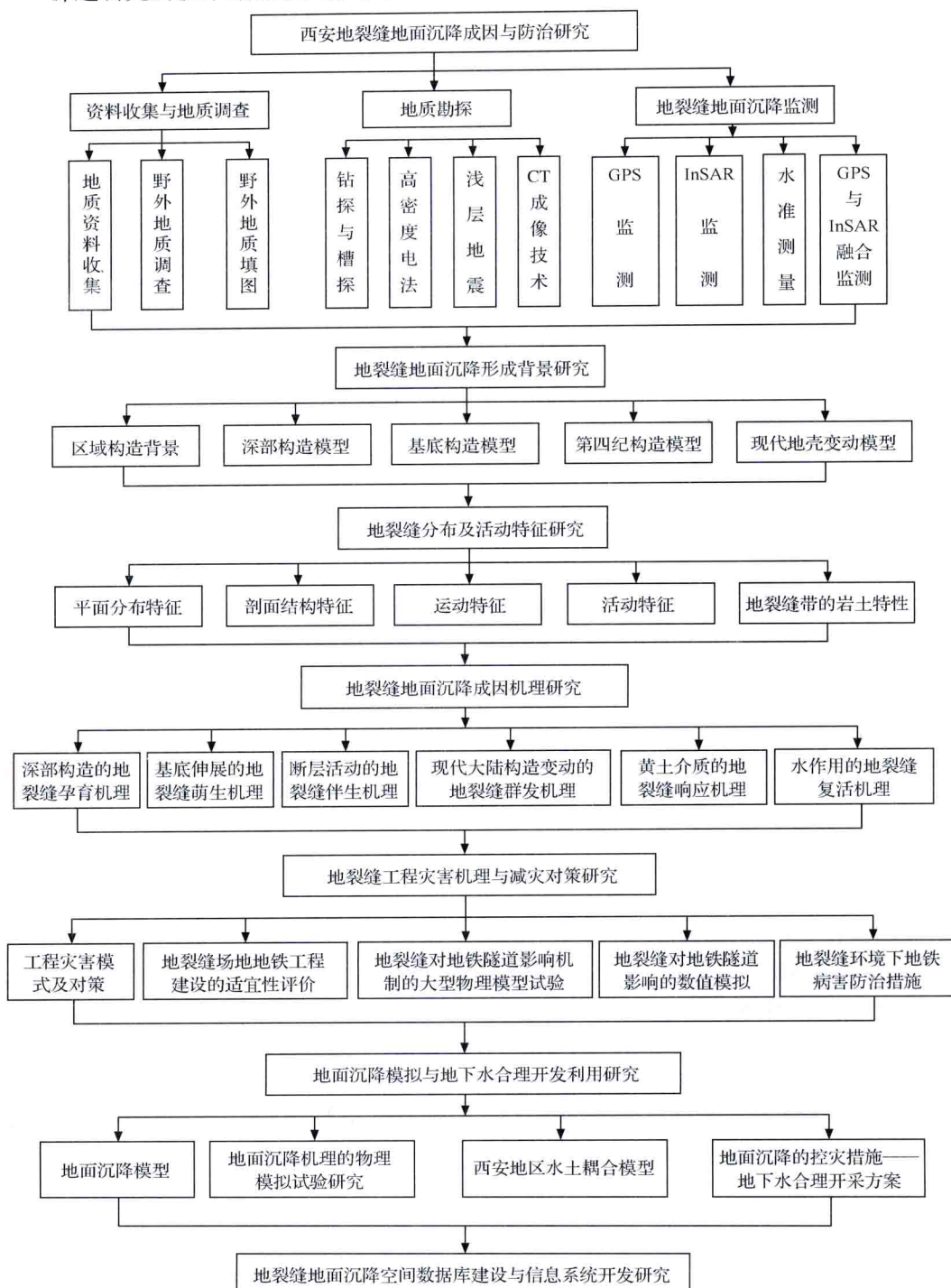
为了解决上述问题,我们成立了由工程地质、岩土工程、地质灾害、水文地质、结构工程、地球物理、大地测量、遥感技术和地理信息系统等不同学科专业技术人员组成的课题组,开展了大量的地面调查与填图、地质与地球物理勘探、土工试验与现场原位测试、GPS 与 InSAR 监测、大型物理模型试验、数值模拟与科学计算、数据库与信息系统建设等工作(项目实施技术路线框图)。

经过五年的艰辛工作,我们对西安地裂缝地面沉降形成的地质背景与条件、空间分布规律、历史与现今活动状况、形成机理、工程灾害机理与致灾模式、灾害控制与减灾对策等有了全新的认识,取得一系列的重要学术成果与应用成果。

(1) 在大量调查和勘探工作基础上,编制了一批重要基础性图件,包括西安地区地貌图(1:2.5万)、西安地裂缝场地工程地质图(1:2.5万)、西安地裂缝分布图(1:2万)、西安市工程地质剖面图(1:2.5万)、西安地裂缝地震勘探剖面图(19张)、西安地裂缝CT成像剖面图(19张)、西安地面沉降 InSAR 监测系列成果图(7张)、西安地面沉降累积总量图、西安地裂缝带状展示图(14张)、西安地区水文地质工程地质钻孔柱状图(975张)、西安地区地裂缝钻探剖面图(249张)和西安地区地热钻孔柱状图(54张),形成了迄今为止西安地裂缝地面沉降最全面的图件成果,为西安城市建设、工程建设、防灾减灾提供了重要的基础资料。

(2) 通过详细的调查与勘探工作,我们获得多项地质新发现:①新发现临潼-长安断裂以北的 F_{14} 地裂缝和以南的长安地裂缝;西安地裂缝西过皂河,东越浐河,向南达韦曲镇,说明地裂缝分布不受地下水开采范围所限。②通过精细地球物理勘探,在西安地区第四纪地层中发现断点301个,其中,30个属已探明的14条西安地裂缝;100个属西安地裂缝的次级缝和隐伏地裂缝,其断面均已切入第四系;17个与临潼-长安断裂、渭河断裂及浐灞河断裂有关;其余断裂点属区域断层或次级断层。显然,西安地区第四纪土层中发育一套构造破裂系统,它们成为西安地区地裂缝发育的构造基础。③通过地质勘探,发现地裂缝与活断层相伴生,几乎每条地裂缝都与下伏断层相连,普遍呈“y”形结构特征,断距随深度增大,具同沉积断层特征,地裂缝是构造破裂面在地表的露头。④通过深大探槽揭示及测年发现,晚更新世以来,西安所在的渭河盆地至少发生过三次盆地拉张裂隙事件,并伴随着宽大地裂缝的形成和多条地裂缝的群发,表明西安地裂缝的形成可能经历过较长的、多期的演化过程。⑤通过GPS观测资料的分析与处理,发现西安所在的渭河盆地现今伸展具明显的分区特征,泾阳-三原-西安一带现今NW-SE向的引张伸展量明显偏大,反映了泾阳-三原-西安一带地裂缝群发的特殊构造应力背景。

课题研究的技术路线框图如下。



(3) 通过地球物理勘探和地震层析成像分析,并综合分析利用已有各种勘探资料,首次建立了西安地区的四个地质构造模型,即上地幔隆起-中地壳流展-上地壳拉张的深部构造模型;基底伸展-断块掀斜的基底构造模型;继承性伸展-多级破裂的第四纪结构模型;区域引张-断层伸展-地表开裂的现代构造变动模型。这些构造模型的建立,对深化认识西安地裂缝的成因具有重要意义:上地幔的顶托作用和中地壳的流展作用为西安地区基底伸展及地壳浅部的拉张变形和破裂面的形成提供了动力源;西安地区基底被众多伸展断层所分割,断块发育、结构破碎、断块的掀斜活动和断层的伸展活动为地裂缝的形成提供了发育空间和伸展应力条件;第四纪时期,盆地的继承性伸展和断层的同沉积位错,在第四系中形成多级多组破裂面,为地裂缝的形成塑造了原型;区域引张-断层伸展-地表开裂的现代地壳变动作用,为西安地裂缝的形成与活动提供了区域动力。

(4) 通过大量的土力学试验、现场原位试验、大型物理模型试验、数值模拟及科学计算,在地裂缝地面沉降成因的理论研究方面取得了六项新的突破:

第一,黄土破裂力学特性试验研究。试验揭示,黄土自身的弱抗拉特性和遇水时短期内出现流变开裂的特性是黄土地裂缝发育的内在原因之一。

第二,断层活动的地裂缝响应机理。大型物理模拟和数值模拟结果表明,正倾滑隐伏断层蠕动时,平面和剖面上均出现两条倾向下盘的主裂缝带和多条细裂缝,进一步证明西安地裂缝是一种通达地表的构造破裂面。

第三,盆地基底伸展的地裂缝萌生机理。数值模拟计算表明,盆地的基底伸展变形可使盆地盖层中的水平向应力由压应力状态逐渐转变为拉应力状态,并在已有伸展断层的上盘土体中产生拉伸破裂效应,从而有利于土体中地裂缝的产生。

第四,水作用下地裂缝形成与开启与复活机理。现场调查、试坑试验与数值计算表明,先期断层面有利于超采地下水致裂,地表水的渗透变形是地裂缝反复开裂的主要原因。

第五,超固结土的地面沉降机理。监测资料分析与数值模拟结果表明,西安地面沉降与承压水头下降呈正相关关系,过量开采承压水是造成西安地面沉降的主要原因;大型物理模拟试验和高压渗透固结试验结果表明,水位下降时,黏土层的压缩变形滞后,砂层变形明显。

第六,现代大陆构造变动的地裂缝群发机理。以 GPS 观测资料为约束的多种工况的数值模拟结果表明,西安所在的渭河盆地主要受甘青块体向渭河盆地挤出的影响,其次为华北、华南块体向南东不协调运动的影响,在西安所在的关中地区形成 NNW - SSE 向拉张应力。在这种应力作用下,西安地区已有的 NEE - SWW 向构造破裂面开启复活,而且西安地区拉张伸展量明显大于周围地区,为西安地裂缝群发提供了区域构造应力条件。

在上述研究工作的基础上,我们概括西安地裂缝的形成机理为:深部构造孕育地裂缝、盆地伸展萌生地裂缝、黄土介质响应地裂缝、断层活动派生地裂缝、应力作用群发地裂缝、抽水作用加剧地裂缝以及表水渗透开启地裂缝。概言之,西安地裂缝的成因模式为盆地伸展背景下的断层与水耦合作用成因模式。

(5) 研究开发了地裂缝地面沉降探测与监测的四项新技术。研发的黄土隐伏地裂缝的 CT 成像探测技术可有效地识别出超浅层隐伏地裂缝信息;新研制的 GPS 数据处理软

件,极大地提高了地面沉降 GPS 监测的精度;InSAR 监测技术的应用,得到了西安地区地面沉降变化的“基因谱”;GPS 与 InSAR 相融合的监测新技术,有效地获得了地裂缝活动的信息。

(6) 通过大型物理模型试验和大量数值模拟分析,攻克了世界上首例地铁工程地裂缝减灾重大技术难题——西安地铁工程如何防治地裂缝灾害;确定了地铁在百年寿期内,每条地裂缝的垂直位错预留量;在分析计算地裂缝变形带和影响带宽度的基础上,推算出了每条地裂缝地段地铁隧道设防长度;发现了地裂缝危害地铁隧道的四种变形破坏模式;提出了地铁隧道适应地裂缝变形的四种工程结构措施。这些成果均已应用于西安地铁一、二、三号线的设计与施工中,并支持着其他地铁线路的建设,为西安地铁建设作出了重要贡献。

(7) 推出的三大重要技术成果为西安城市建设和防灾减灾提供了重要技术支撑:一是在西安地区建立了以 GPS 和 InSAR 技术为骨架的地面沉降地裂缝监测网络体系,可不断地为国家有关部门和地方政府提供监测资料;二是建立了西安地裂缝地面沉降空间数据库和信息管理系统,为西安城市规划、工程建设及减灾防灾提供了信息服务;三是提出了西安市地下水资源合理开采利用的五大方案,为西安市防控地面沉降地裂缝灾害提供了决策依据。

本项目已告一段落,但由于西安地区地质条件十分复杂,地裂缝地面沉降还在发展中,研究解决了一批问题,还遗留了一些问题,同时还会不断出现一些新问题。因此,研究工作还将继续下去。幸运的是,中国地质调查局已经启动我们的新一轮研究工作,我们将在深化西安地裂缝地面沉降研究的基础上,全面开展整个汾渭盆地地裂缝地面沉降成因与减灾的系统研究。几年后,将争取把另一份系统研究成果奉献给大家。

本专著是课题组全体人员共同研究的集体成果,参加课题研究的主要人员有彭建兵、张勤、黄强兵、门玉明、李新生、李斌、王玮、孙渊、王庆良、赵超英、李喜安、王利、范文、邓亚虹、王启耀、胡志平、李寻昌、刘永华、白超英、蒋臻蔚、李忠生、李同录、张骏、张永志、王卫东、石玉玲、卢全中、宋彦辉、刘万林、成伟、张菊清、武晓忠、陈立伟、孙萍、翟越、万伟锋、阎金凯、孙刚臣、何红前、孟令超、刘聪、姬永尚、黄观文、瞿伟、杨成生、丁晓光、李红、石明、戴海涛、金鼎、常红、黄静、郭晋燕、朱武、张静、祁晓明、管建安、蒋光伟、刘洪佳、李文阳、刘洋、张希雨、张利萍、吕玉楠、徐永龙、张金辉、王文敏、阎方方等。

本书各章执笔分工如下:前言、第 1 章由彭建兵执笔;第 2 章由李新生、彭建兵执笔;第 3 章由孙渊、孙党生、刘永华执笔;第 4 章由张勤、赵超英、王利执笔;第 5 章由王玮、彭建兵、万伟锋执笔;第 6 章由彭建兵、邓亚虹、王启耀执笔;第 7 章由门玉明、李寻昌、石玉玲执笔;第 8 章由黄强兵、彭建兵、胡志平、王启耀执笔;第 9 章由王玮、万伟锋、孙刚臣执笔;第 10 章由李斌和彭建兵执笔。全书由彭建兵统稿并定稿。

本成果是各有关方面大力支持的结果。我们首先要感谢国土资源部副部长、中国地调局局长汪民教授,中国地质调查局原局长孟宪来,国土资源部科技司司长姜建军,国土资源部环境司司长关凤浚,中国地质调查局副局长钟自然、王学龙、李金发,局副总工、水环部主任殷跃平教授,计划财务部武选民教授,水环部现任主任文冬光教授,中国地质环境监测院副院长张作辰教授,水环部副主任郝爱兵教授,地质灾害处处长李铁锋教授,环

境处处长姜义,以及杨澍、张开军、李晓春、张二勇等同志对我们研究工作的信任、支持和帮助;感谢国家自然科学基金委员会地学部的柴育成副主任,姚玉鹏和刘羽处长,王广才和熊巨华等主任对我们研究工作的支持;感谢国土资源部环境司柳源巡视员,陶庆法副司长,薛佩瑄、李明路、熊自力、胡杰等处长和部科技司马岩处长等对我们研究工作的支持和帮助;感谢交通部西部交通建设科技项目办公室的陈国靖老主任、赵之忠主任、魏道兴副主任和谢素华处长对我们的帮助及支持;感谢陕西省国土资源厅梁枫副厅长、喻建宏副厅长、雷鸣雄副厅长、李强副厅长、朱利平处长、宁奎斌处长、肖平新副处长和王雁林博士,西安市国土局田党生局长、王勇处长和刘铁铭博士对我们研究工作的支持与帮助;感谢西安地铁建设有限公司陈东山总经理、雒继锋总工、王鸣晓处长、杨军处长、李宇东处长和高虎艳高级工程师以及康佐、杨卫红、魏鹏勃、邓国华等专家对我们研究工作的支持和帮助;感谢中铁一院杨沛敏副总工、孟祥连副总工、李谈副总工、张富忠、李团社、王海祥、杨志国、雷永生、相旭等高级工程师对我们研究工作的支持和帮助;感谢中国地质调查局西安地调中心的樊钧主任、李文渊主任、杜玉良书记以及张茂省、侯光才、杨六岗、赵玉杰、朱桦、徐有宁等教授提供的无私帮助与支持;感谢中国地质调查局水环地调中心的郭建强、孙党生、孙晟、任政委等专家对我们研究工作的支持;感谢机械工业勘察院张家明教授多年来对我们的精心指导和全力支持;感谢林在贯、张苏民、关文章、王德潜、何宗平、张炜、徐张建、董忠级、林杜军、谢振泉、王禄仕、张西前、朱越飞、何军、王治军、李曦涛、韩恒悦、米丰收、冯希杰、陈党民等专家对我们工作的支持与帮助;感谢陕西省地质环境监测总站的宁社教、索传眉、金海峰、阎文中、陶虹等专家对我们研究工作的支持;感谢长安大学前任校长周绪红院士、现任校长马建教授,党委副书记杜向民教授和白华教授,副校长刘伯权教授、赵均海教授、沙爱民教授和刘建朝教授,科技处处长贺栓海教授、副处长裴先治教授、副处长程淑贞、基金科科长郭军杰以及张洪波、贺梅等同志对我们研究工作给予的始终如一的支持。感谢张国伟院士、陈融院士、李德仁院士、翟裕生院士、邓起东院士、王思敬院士、郑颖人院士、金振民院士、汤中立院士、李佩成院士、杨元喜院士和彭苏萍院士对我们的鼓励和支持;感谢胡广韬、孙建中、宫同伦、杨巍然、肖荣久、王景明、杜东菊、韩文峰、黄润秋、唐辉明、伍法权、施斌、田廷山、武强、刘传正等教授对我们多年的支持和帮助;感谢长安大学谢永利教授、杨晓华教授为我们的大型物理模拟工作提供的无私帮助;本专著的科研成果结题鉴定时,曾蒙王思敬院士、李德仁院士、林在贯大师、殷跃平教授、唐辉明教授、许再良大师、张家明教授、王德潜教授、唐益群教授、何庆成教授级高工、方正教授级高工、侯光才教授级高工和高虎艳高工等专家的高度评价和悉心指正,使我们的成果增色不少,特向各位专家致以诚挚的谢意。最后要感谢长安大学地质工程与测绘学院的各位同事,是他们分担了我们的工作、鼎力相助才使我们的研究工作顺利完成。

目 录

序

前言

第 1 章 西安地裂缝形成的地质背景	1
1.1 西安地区区域构造背景	2
1.1.1 太古代至元古代构造阶段	3
1.1.2 古生代构造阶段	3
1.1.3 中生代构造演化阶段	4
1.1.4 新生代构造演化阶段	4
1.2 西安地区深部构造模型	5
1.2.1 深部地球物理场特征	5
1.2.2 深部构造模型	11
1.3 西安地区基底构造模型	12
1.3.1 基底构造格局	12
1.3.2 新生代盖层结构特征	13
1.3.3 新生代沉积相演化特征	14
1.3.4 基底构造模型	15
1.4 西安地区第四纪结构模型	17
1.4.1 第四纪地层结构	17
1.4.2 第四纪地层空间分布与沉积环境	22
1.4.3 第四纪地貌格局	22
1.4.4 第四纪结构模型	28
1.5 西安地区现代地壳变动模型	29
1.5.1 断块活动特征	29
1.5.2 断裂活动特征	30
1.5.3 地震活动特征	40
1.5.4 现代构造应力场特征	44
1.5.5 现代地壳变动模型	46
第 2 章 西安地裂缝发育特征与活动性	48
2.1 西安地裂缝的平面分布特征	49
2.1.1 地裂缝的分布与分段特征	49
2.1.2 地裂缝的平面展布特征	82
2.1.3 地裂缝分布与地质环境的关系	86
2.2 西安地裂缝的浅部剖面结构特征	89

2.2.1	地裂缝地表变形的剖面特征	89
2.2.2	地裂缝的浅部剖面组合特征	92
2.2.3	不同地貌单元的地裂缝剖面结构特征	95
2.2.4	地裂缝的深部剖面结构特征	100
2.2.5	地裂缝的破裂带宽度及影响带宽度	103
2.3	西安地裂缝的运动与活动特征	106
2.3.1	西安地裂缝的运动特征	106
2.3.2	西安地裂缝历史活动特征	108
2.3.3	西安地裂缝现今活动特征	108
2.3.4	西安各条地裂缝的活动特征	112
2.3.5	地裂缝变形观测结果综合分析	123
2.3.6	西安地裂缝活动的基本规律	127
2.4	西安地裂缝带岩土工程特性	128
2.4.1	地裂缝变形带物理力学参数	128
2.4.2	地裂缝带内外岩土物理力学性质对比	129
第3章	西安地裂缝地球物理探测	137
3.1	地震探测工作概况	138
3.1.1	地震地质条件	138
3.1.2	工作布置及主要成果	139
3.2	地裂缝多波地震探测技术	141
3.2.1	多波地震资料采集技术	141
3.2.2	地震资料处理解释技术	145
3.2.3	地裂缝与断层地震正演模拟	156
3.3	西安地裂缝地球物理异常特征分析	176
3.3.1	地震波场与断裂构造特征分析	176
3.3.2	地裂缝与断层发育及展布特征	185
3.4	结论	198
第4章	西安地裂缝地面沉降 GPS 与 InSAR 监测	199
4.1	基于 GPS 定位技术的地面沉降监测发展与应用	201
4.1.1	GPS 技术监测地面沉降的发展历史	201
4.1.2	GPS 大地高与水准正常高监测形变的关系	202
4.2	西安地区地裂缝地面沉降 GPS 监测网的设计与实施	204
4.2.1	西安地区地裂缝地面沉降 GPS 监测网的设计与建设	204
4.2.2	GPS 监测点的选埋及技术措施	206
4.2.3	西安地区地裂缝地面沉降 GPS 监测网的施测	207
4.3	高精度 GPS 监测技术与高精度基线处理理论	208
4.3.1	高精度 GPS 变形监测作业技术方案	208
4.3.2	高精度 GPS 基线处理理论	211