

浅生时效构造与人类工程

EPIGENETIC TIME-DEPENDENT STRUCTURE
AND HUMAN ENGINEERING

王兰生 李天斌 赵其华 著



地质出版社

· 北 京 ·

责任编辑：屠涌泉 李 奇

ISBN 7-116-01701-1



9 787116 017016 >

ISBN 7-116-01701-1

P·1371 定价：8.80 元

浅生时效构造与人类工程

EPIGENETIC TIME-DEPENDENT STRUCTURE
AND HUMAN ENGINEERING

王兰生 李天斌 赵其华 著

地质出版社

· 北 京 ·

(京)新登字 085 号

内 容 提 要

本书系统论述了地壳浅表层部位因区域性卸荷所造成的特殊变形破裂迹象,提出了浅生时效构造这一新的概念。这类构造明显区别于一般地质构造和表生改造形迹,对其发育分布区的区域稳定和地面岩体稳定起着重要控制作用,对人类工程活动有重要影响,并可能成为地下水、油、气运移通道和储体。

书中通过大渡河铜街子电站坝区地质体中的变形破裂和西安地裂缝两个典型实例的深入研究,对这类构造形成演化理论作了系统分析,并建立了一套评价预测和研究的系统方法。本书可作为高等院校有关专业的教学参考书,也可供地质科技工作者参考和应用。

图书在版编目(CIP)数据

浅生时效构造与人类工程/王兰生等著. —北京:地质出版社,1994.7
ISBN 7-116-01701-1

I. 浅… II. 王… III. 地层学-大地构造学-地质断层 IV. P553

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 08376 号

本研究得到中国科学院工程地质力学开放
研究实验室基金和国家自然科学基金资助

地质出版社出版
(100013 北京和平里七区十楼)

*

责任编辑:屠涌泉 李 奇

成都理工学院印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所发行

开本:787×1092¹/₁₆ 印张:11.00 字数:250000

1994年7月北京第一版·1994年7月第一次印刷

印数:1—1000册 定价:8.80元

ISBN 7-116-01701-1

P·1371

序

随着人们的实践,科学在不断的发展。在我们工程地质界,近年来出现了“浅生时效构造”这一新的概念。这是王兰生教授等从80年代中期起通过生产实践和科研实践逐渐建立起来的。十多年来,他们陆续发现在一些工程地区地壳的浅表层部位,发育有一套具有区域性的特殊变形破坏迹象,对工程建设有着重要的影响。

《浅生时效构造与人类工程》一书全面系统地论述了这一概念的内涵、基本特征和模式,详细分析了两种基本模式的应力环境、形成机制和演化过程。明确提出了浅生时效构造的定义为:晚近期以来由于区域性剥蚀或侧向扩张引起应力环境变化,在地壳浅表层中形成的时效变形破坏迹象。其基本特征是岩体中多张性或张扭性破裂,造成岩体或地质体松动、透水性增强。这是一些地区遭受剥蚀卸荷或侧向卸荷,引起岩体中的残余应变能卸荷回弹而生成的。所以,这种地区属于释能区,具有现今地应力偏低的特点。按其成因可分为垂向卸荷(区域性剥蚀卸荷)型和侧向卸荷(构造重力扩展)型两大类型。进一步按照变形破裂特点,前者又可分为四种类型;后者又可分为两种类型。每种类型各有其形成条件和相应的实例。从这类构造的特征和形成机制来看,它与一般地质构造是不同的,也与表生构造有所区别。但是,它的形成和演化还是受地貌演化和新构造运动的控制的,因而具有周期性、脉动特征。加之岩土体的流变力学性能,使之表现出明显的阶段性。

在这项研究中,作者在野外调查研究的基础上,把地质构造演化分析、地貌过程分析和岩体力学分析结合起来,通过典型实例研究,建立了一套系统的研究方法。并在卸荷状态下岩石变形破裂的实验岩石力学,卸荷过程地质力学模拟,时效特征数值模拟和灰色动态时序分析等技术方法的开发应用方面有所突破和创新。由此可见,敏锐的观察、深入的思考和多种方法的模拟分析是获得这一新概念的有利因素。这项研究填补了我国地质研究中的重要空白,为工程地质开辟了一个新的研究领域,在推进学科发展中必将做出重要贡献。

要紧的是这种构造发育在地壳的浅表层部位,这里恰恰是人类工程活动的场所,各类建筑物都是建筑在这一部位的。可以想像得到,这种张性破裂高度发育、岩体松动、透水性较强、地应力偏低的特殊条件将会给工程建设带来怎样的后果呢?所以,认识浅生时效构造对区域地壳稳定性评价、岩体稳定性分析、地

质灾害的预测与防治、地质环境的评价与保护都是至关重要的。由此可知,这项研究的实际意义是巨大的,在一些工程中已经获得了显著的经济和社会效益,作出了重要贡献。

书中列举了一些典型实例,最近作者又在其它一些地区见到了同类的构造形迹。可以说明浅生时效构造具有一定的普遍性。相信随着生产实践的开展,还会在其它地区发现这类构造。这有待于广大工程地质工作者共同努力,予以大力支持,使之受到检验,得到提高,不断地补充完善。

张咸恭

1994年6月24日于北京

目 录

序

前 言	(1)
-----	-----

第一部分 浅生时效构造导论

1. 浅生时效构造的发现	(3)
2. 浅生时效构造的基本特征及定义	(8)
3. 浅生时效构造的基本模式	(11)
4. 浅生时效构造的研究思路和方法	(14)
5. 浅生时效构造与人类工程活动的关系	(18)

第二部分 垂向卸荷(区域性剥蚀)型浅生时效构造

——大渡河铜街子变形破裂模式 (20)

第一章 铜街子变形破裂体系形成的地质环境及其主要特征	(21)
1.1 典型研究区地质地貌概况	(21)
1.2 特殊变形破裂体系发育分布特征	(25)
1.3 小结	(36)
第二章 铜街子变形破裂形成(活动)年代和应力环境的研究	(37)
2.1 断裂体系形成(活动)年代的研究	(37)
2.2 变形破裂形成期应力环境的研究	(43)
2.3 小结	(49)
第三章 卸荷状态下变形破裂机制的实验岩石力学研究	(51)
3.1 试验设计与方法	(51)
3.2 试验及结果分析	(52)
3.3 小结	(56)
第四章 铜街子变形破裂形成过程的地质力学再现模拟研究	(57)
4.1 地质力学模型	(57)
4.2 模型设计与试验	(58)
4.3 试验成果及分析	(62)
4.4 小结	(64)
第五章 铜街子变形破裂演化过程时效特征的数值模拟研究	(66)
5.1 模拟方法和原理	(66)
5.2 计算模型	(68)
5.3 计算成果分析	(70)
5.4 小结	(76)
第六章 主要认识与结论	(77)

6.1	铜街子型浅生时效构造的形成机制·····	(77)
6.2	铜街子型浅生时效构造的发育分布规律及鉴别标志·····	(79)
6.3	地质比较·····	(79)
6.4	工程实践意义·····	(83)
6.5	主要结论·····	(85)

第三部分 侧向卸荷(构造重力扩展)型浅生时效构造

——西安地裂缝与地面沉降·····	(86)
-------------------	------

第七章	西安地裂缝区域地质构造动力背景·····	(87)
7.1	汾渭盆地格架与沉积·····	(87)
7.2	盆地构造动力环境·····	(90)
7.3	盆地构造应力场及断裂新活动特征·····	(95)
第八章	西安地裂缝形成机制的地质建模分析·····	(99)
8.1	西安地裂缝发育分布特征·····	(99)
8.2	西安地裂缝已有成因观点评述·····	(104)
8.3	西安地裂缝的构造重力扩展成因论·····	(105)
第九章	西安地裂缝形成过程再现模拟·····	(109)
9.1	地质力学模型设计·····	(109)
9.2	试验程序·····	(110)
9.3	试验成果及分析·····	(110)
9.4	小结·····	(112)
第十章	西安地裂缝量化分析的数值模拟研究·····	(113)
10.1	地裂缝波及范围的有限元模拟·····	(113)
10.2	地裂缝活动特征的离散元模拟·····	(119)
第十一章	西安地裂缝与地面沉降·····	(124)
11.1	地面沉降的基本特征·····	(124)
11.2	地裂缝与地面沉降相关性的灰色系统分析·····	(128)
11.3	地裂缝和地面沉降活动量趋势分析·····	(134)
第十二章	西安地裂缝及地面沉降与场地稳定性·····	(137)
12.1	地裂缝和地面沉降对工程建筑物的影响·····	(137)
12.2	场地稳定性的模糊综合评判·····	(142)
12.3	防治对策·····	(146)
12.4	场地稳定性管理控制系统初步研究·····	(149)
第十三章	主要结论与认识·····	(152)
13.1	主要结论·····	(152)
13.2	地质比较·····	(153)
13.3	进一步研究建议·····	(155)
参考文献·····		(157)
英文摘要·····		(160)

EPIGENETIC TIME-DEPENDENT STRUCTURE AND HUMAN ENGINEERING

Contents

Preface	(1)
Section one INTRODUCTION TO EPIGENETIC TIME-DEPENDENT STRUCTURES	(3)
1. Discovery of epigenetic time-dependent structures	(3)
2. Basic features and definition of epigenetic time-dependent structures	(8)
3. Basic models of epigenetic time-dependent structures	(11)
4. Studying route and methods of epigenetic time-dependent structures	(14)
5. Relation between epigenetic time-dependent structures and human engineering activity	(18)
Section two TYPICAL CASE STUDY OF VERTICAL UNLOADING (REGIONAL DENUDATION) EPIGENETIC TIME-DEPENDENT STRUCTURES — Deformation-fracture system of Tongjiezi in Dadu river	(20)
Chapter 1 Geological environment and characteristics of the deformation and fracture system	(21)
1.1 Outline of geological and geomorphic features in the typical study area	(21)
1.2 Developing and distribution features of the special deformation-fracture system	(25)
1.3 Brief conclusions	(36)
Chapter 2 Forming(active) era of the deformation-fracture system and its geostress environment	(37)
2.1 Forming(active) era of fracture system	(37)
2.2 Geostress enviroment of the forming era	(43)
2.3 Brief conclusions	(49)
Chapter 3 Experimental rock mechanics study on deformation-failure mechanism under unloading condition	(51)
3.1 Test design and methods	(51)
3.2 Results analysis	(52)
3.3 Brief conclusions	(56)
Chapter 4 Reappearance simulation on the evolution process of the deformation-fracture system	(57)
4.1 Geomechanical model	(57)
4.2 Design and test of the geomechanical model	(58)
4.3 Results analysis	(62)
4.4 Brief conclusions	(64)
Chapter 5 Numerical simulation on the time-dependent behavior of the forming procedure of the deformation-fracture system	(66)
5.1 Simulation methods and principles	(66)
5.2 Numerical model	(68)

5.3	Analysis of computation results	(70)
5.4	Brief conclusions	(76)
Chapter 6	Main understanding and conclusions	(77)
6.1	Formation mechanism of the epigenetic time-dependent structures	(77)
6.2	Distribution regularity and diacritical mark of the epigenetic time-dependent structures	(79)
6.3	Geological comparision	(79)
6.4	Significances to engineering practice	(83)
6.5	Main conclusions	(85)

Section three TYPICAL CASE STUDY OF LATERAL UNLOADING (TECTONIC GRAVITY SPREADING) EPIGENETIC TIME-DEPENDENT STRUCTURES

	——Ground fissures and land subsidence in Xi'an city	(86)
Chapter 7	Dynamic settings of regional geologic structure of Xi'an ground fissures	(87)
7.1	Geologic frame and deposition of Fen-Wei basin	(87)
7.2	Dynamic settings of basin structures	(90)
7.3	Stress field features of the basin and recent activity of faults	(95)
Chapter 8	Analysis on the formation mechanism of Xi'an ground fissures	(99)
8.1	Developing and distribution characteristics of Xi'an ground fissures	(99)
8.2	Commentary on genetic viewpoints of the ground fissures	(104)
8.3	On the "tectonic gravity spreading" viewpoint of the ground fissures	(105)
Chapter 9	Reappearance simulation on the evolution process of Xi'an ground fissures ..	(109)
9.1	Design of geomechanic model	(109)
9.2	Test procedure	(110)
9.3	Test results and analysis	(110)
9.4	Brief conclusions	(112)
Chapter 10	Quantitative analysis on Xi'an ground fissures by numerical simulation	(113)
10.1	FEM simulation on the scope of the ground fissures	(113)
10.2	DEM simulation on the activity features of the ground fissures	(119)
Chapter 11	Ground fissures and land subsidence in Xi'an city	(124)
11.1	Basic features of the land subsidence	(124)
11.2	Grey system analysis on the correlation between ground fissures and land subsidence	(128)
11.3	Analysis on activity quantity of the ground fissures and land subsidence	(134)
Chapter 12	Ground fissures ,land subsidence and site stability of Xi'an city	(137)
12.1	Influence of ground fissures and land subsidence to architectures	(137)
12.2	Fuzzy evaluation on the site stability	(142)
12.3	Protection measures	(146)
12.4	Preliminary study on the supervision-control system of site stability	(149)
Chapter 13	Main conclusions and understanding	(152)
13.1	Main conclusions	(152)
13.2	Geological comparison	(153)
13.3	Future research suggestions	(155)
References		(157)
Extended abstract		(160)

前 言

80年代中期以来,在我国某些重大工程的勘察研究中,陆续发现地壳的浅表层部位发育有一套具区域性分布特征的变形破裂迹象。它既区别于一般构造形迹,也与受现代地貌形态控制的表生结构有所不同。这类构造与地质构造之间有一定成生联系,同时又与第四纪地貌过程中地壳浅表部应力环境的区域性变化有关。变形破裂的形成与演化过程具有明显的时效特征,因而称其为**浅生时效构造**,为一种十分特殊的构造层。

这类构造发育在地壳的浅表层部位,并且大多表现为张性或张扭性破裂,促使岩体或地质体发生一定程度的松动和扩展;断裂体系又往往可以成为地下水、油、气的良好运移通道和储体,也是大气圈和水圈各种外营力深入岩体的有利通道。浅生时效构造的上述特征使它在很大程度上控制了发育分布区的区域稳定性和岩体稳定状况,并且确定或影响了区域岩体表生改造的方式和演化趋势。这类构造体系还可能成为地下水、热水和油气等的富集带,研究这类构造无论在理论上和人类工程实践中都具有十分重要的意义。

浅生时效构造这一新的概念是通过一些典型实例的深入研究而逐步形成的。1984年受水电部成都勘测设计院委托,我们研究了四川大渡河铜街子坝区的特殊地质构造现象,首次接触到了这类特殊变形破裂迹象。通过一些特殊测试和再现模拟,证实这是一种区域性剥蚀卸荷条件下产生的构造形迹,提出了浅生时效变形构造这一新的概念。1986年5月这一课题被列为中国科学院工程地质力学开放实验室资助项目,继续作了深入研究。这项研究成果在铜街子大坝施工和运行期间得到全面验证,及时正确解答了大坝勘察、施工运行中所遇到的各种疑难问题,为大坝提前一年多竣工和安全运营作出了贡献。1990年被中科院工程地质力学开放实验室评审委员会评为最优秀成果,达到国际先进水平。课题主要研究人员有王兰生(课题负责人)、李天斌、徐进等,张倬元教授担任技术顾问。以后课题组部分成员又参加了雅鲁江二滩电站和桐子岭电站、大渡河龚嘴电站和大岗山电站以及黄河大柳树电站的现场调研,扩大和加深了对这类构造内涵的认识。

1990年,受陕西地矿局水文观测总站委托,合作承担了“西安地裂缝与地面沉降及其控制”课题研究。这项研究是以成都理工大学(原成都地质学院)(徐进、黎克武、黄润秋、尚岳全、李天斌、赵其华等,王兰生、王士天任技术顾问)和陕西地矿局第一水文地质队(李伯平、熊润清、张保增等任技术顾问)完成的“西安地区地壳稳定性模拟专题研究”(1989.4—1990.7)为前期成果的后续课题(1990.10—1992.5)。研究中对西安地裂缝的**构造重力扩展**成因观点作了深入系统的论证,运用灰色动态关联时序分析方法探讨了地裂缝与地面沉降的相关性,对西安市场地稳定性作出了系统评价和预测,并提出了一套管理控制系统,为城市规划和综合治理提供了重要依据。课题组主要成员有王兰生(课题负责人)、赵其华、郑明新等,水文观测总站参加研究的有张茂增(负责人)、沈小珍和康金栓等。目前,该项目已被列为国家自然科学基金资助项目,作继续深入研究。对西安地裂缝的研究,拓宽了浅生时效构造的内涵,将它作为侧向卸荷扩展类型与前述铜街子式垂向卸荷类型加以对照。

这两项研究使我们对浅生时效构造建立了更为全面的概念,认识到在地壳的浅表层部位由于区域性垂向剥蚀卸荷和侧向卸荷扩张,确有可能形成一特殊的构造层。它呈区域性或带状分布,往往是与人类工程活动最直接发生关系的部位,并可成为地质构造与地面岩体运

动之间联系的纽带。对它进行系统研究填补了地质体研究中的重要空白。

本书分为三部分。第一部分为导论,全面系统论述了浅生时效构造的基本概念、模式、类型和研究思路与方法,由王兰生执笔。第二、三部分为典型实例分析,系统论证了铜街子变形破裂(垂向卸荷型)和西安地裂缝(侧向卸荷扩展型)两类典型模式,分别由李天斌,赵其华执笔,王兰生修改定稿。

这是一本从理论与实践方面系统论述浅生时效构造的论著,这项研究仍处于探索阶段,尚在继续研究,希望得到地质和工程界的专家学者及实践工作者们的关注和指正。

本书的编写得到了张咸恭、孙广忠、胡海涛、王思敬、许兵等教授的关心和支持,张咸恭教授还在百忙中为本书作序。成都理工学院张倬元、孔德坊、王士天教授,梁虹、尚岳全副教授对课题研究曾给予支持和帮助。谨此一并表示深切的感谢。

作者还要感谢成都理工学院李太熙副编审、李志侃助工(描图)和王汝兵、彭社琴等同志在本书出版过程中给予的帮助。

作者 ·

1994年2月于成都

第一部分 浅生时效构造导论

1. 浅生时效构造的发现

80年代中期以来,随着我国国民经济建设的迅速发展,某些重大工程和资源开发的地质勘察研究中,陆续发现地壳的浅表层部位,发育有一套具区域性分布特征的特殊变形破裂迹象,它既区别于一般构造形迹,也与受现代地貌形态控制的表生结构有所不同。由于它发育在地壳的浅表层部位,并且大多表现为张性或张扭性破裂,因而在人类工程实践中具有重要意义。这类构造造成岩体或地质体松动,可以成为地下水和油、气的运移通道或储体,在一定程度上确定了地区地下水、热水、卤水和石油、天然气等资源的分布和聚集状况;这类构造也是大气圈、水圈各种营力深入岩体的有利通道,因而往往在很大程度上决定了岩体或地质体的稳定状况,控制着岩体表生改造的方式和演化趋势。下列典型实例证实了这类构造的客观存在。

(1) 四川大渡河铜街子电站坝区变形破裂迹象(详见第二部分)

铜街子电站位于大渡河下游,处于川滇南北构造带和四川盆地北东向构造带交接部位。坝址附近地区构造形迹主要为南北向褶皱和北东向断褶(图1)。大坝建在一平缓背斜(两翼倾角 8° 左右)核部之上,背斜轴近南北向展布,与河流流向小角度斜交,向北倾伏。坝基为似层状玄武岩岩体(二叠系, $P_2\beta$)。两岸分布有砂页岩层(二叠系沙湾组 P_2s 和三叠系飞仙关组 T_1f)和灰岩泥灰岩层(铜街子组层 T_1t),岩层倾向山内(图1、2)。80年代初,原水电部成都勘测设计院在坝址区勘察中发现,坝基岩层中发育有层间错动、层间拉裂和层内具等距发育特征的层状破裂面,与此相伴还发育有一套稀疏分布具张剪性特征的小规模中缓倾断裂(图2)。这一套变形破裂体系就其力学性质和组合形式而言,与通常在平缓层状岩体构成的宽谷谷底所见破裂迹象相近,明显不同于一般构造形迹。然而它的发育范围波及两岸岸坡,发育深度达谷底以下数百米深,与现代河谷形态又无明显的相关性,因而又区别于受现代地形控制的表生结构。

通过一系列的研究证明,这些中缓倾断裂形成于上新世(N_2)至更新世(Q_1)。它们的发育

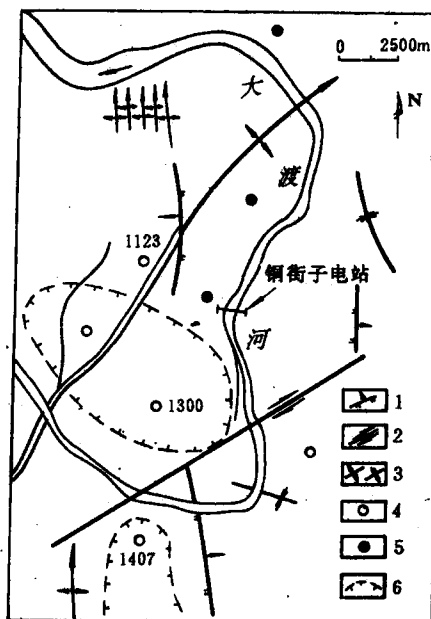


图1 铜街子坝址区域地质概况
Fig. 1 Regional geological map of Tongjiesi
damsite area in Dadu river of China
1. 逆断层; 2. 平移断层; 3. 褶皱;
4. 1300m左右夷平面; 5. 900m左右夷平面;
6. 1300m 夷平面分布范围

分布状况与河谷高阶地(夷平面)的展布状况相吻合。地质力学和数值模拟再现了这类构造的形成和演化过程,证明它是地质体中储有较高残余应变能的岩体,在区域性剥蚀卸荷过程中,随应变能的逐步释放而产生的一种特殊的变形破裂构造。形成发展过程还表现出明显的时间效应。这类构造成为坝基岩体稳定性的主要控制面,并且这一带河谷两岸出现的滑坡,也与这类断裂、破裂面的发育分布状况有关。

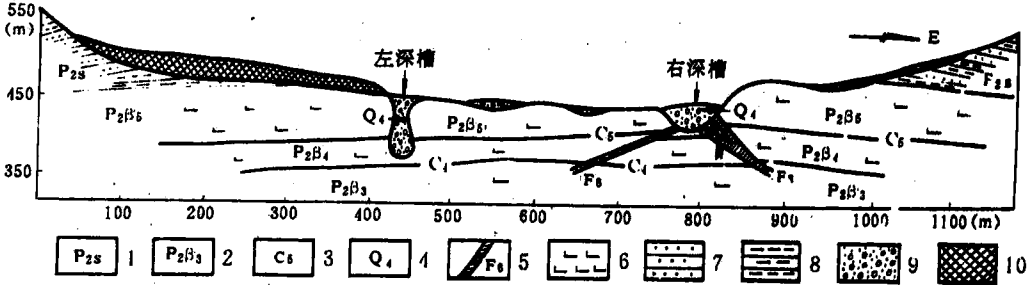


图2 铜街子电站坝区地质剖面图
(参照水电部成都勘测设计院资料)

Fig. 2 Geological profile of Tongjiesi damsite area in Dadu river

1. 上二叠统沙湾组; 2. 上二叠统峨眉山玄武岩; 3. 层间错动及编号; 4. 第四系;
5. 浅生断裂及编号; 6. 玄武岩; 7. 砂岩; 8. 页岩; 9. 冲积物; 10. 崩滑堆积体

大坝施工和运行过程中进一步证实了上述判断。坝基开挖中所揭露的破裂面和断裂,其性状和发育分布特征与勘察和模拟试验推断的情况十分吻合。还发现个别断裂有近期活动迹象,将嵌在断层中的河床冲积卵石“咬”碎,并在卵石表面刻出“齿痕”(参见图1—20、1—21)。研究证明它明显区别于通常所说的“活断层”或“能动断层”,并非因构造活动而引起断层复活,而是由于岩体中残余应变能在河谷下切时进一步释放造成的局部差异回弹剪动。水库蓄水初期,还发生了轻微的水库诱发地震,也证实了这种残余应变能释放的继续,并随着水库蓄满而消失。此外,在坝肩开挖中曾出现逆向坡中产生滑移-拉裂式变形与破坏,其滑移控制面正是这一套中缓倾破裂面。

根据文献资料,巴西伊泰普(ITAIPU)电站坝基地质结构与铜街子所见十分相似(参见图6—2、6—3),John G. Cabrera 和 Las Cruces (1986) 两人的研究证明,坝基岩体中发育一系列中缓倾断裂,其成因与岩体的卸荷有关,并测得坝区现今水平地应力仅有 0.5MPa。它是铜街子式浅生时效构造的极好的对比实例。

(2) 黄河黑山峡大柳树坝址区变形破裂迹象

大柳树地区地处青藏高原东北缘,位于祁连山褶皱带的走廊过渡带东段与划分中国东、西部两大块体的南北向构造带的交汇处(图3)。坝址区岩体主要由寒武系浅变质长石石英砂岩(ϵ_2)夹千枚岩所组成,构造上呈一走向 $NE70^\circ-80^\circ$ 的紧密挤压的倒转背斜,以 70° 左右倾角倾向 SE。背斜两侧被两条对生的断层(F_3 和 $F_{3(7)}$)所切割,走向大体与背斜轴向平行,倾角 70° 左右,剖面上呈一楔形体(图3)。楔形体外侧分布有石炭系、二叠系和三叠系地层。

兰州大学、中国地质大学(北京)、原成都地质学院、西安地质学院、中科院地质研究所

及天津大学组成的专题组对该坝区开展了系统调研(1990.9—1991.12),由韩文峰等撰写了《黄河黑山峡大柳树松动岩体的工程地质研究》专著(1993)。调查证明,大柳树坝址区两岸和坝基为一发育范围很大的“松动岩体”所构成。“松动岩体”有以下主要特征:

①主要表现为沿原有的构造断裂面和层间错动面发生拉张,拉张最显著的优势方向为 $N85^{\circ}-70^{\circ}E/SE$ 或 $NW \angle 80^{\circ}$ 和 $N55^{\circ}-60^{\circ}E/NW \angle 45^{\circ}$ 两组。值得注意的是,这两组断裂的走向大体与坝区楔形体和倒转背斜轴向平行。

②两岸松动发育深度超出当地表生改造(岸坡卸荷、风化、斜坡变形和滑坡等)可能扰动的深度。根据硃探和物探资料,右岸松动深度大于270m,左岸达100m。但是值得注意的是,已查明的松动体限制在楔形范围之内,未超出两侧分割断层(F_1 和 $F_{8(r)}$)。

③岸坡岩体松动分布呈隔档特征,即松动密集带呈现等距分布,其间隔随深度增大而增大。这一特征表明松动体具层状破裂特征;右岸小断层的分布状况,也具有顺岩层走向发育的特征。

④断裂测年资料表明,研究区的主要断层和小断裂自30万年前(相当于中更新世 Q_2 晚期)以来均有过活动,其中测得的楔形体边界断层(F_1 和 $F_{8(r)}$, F_{203} 和 F_{202})的最新活动年代为3万年左右至一万年左右(相当于 Q_3-Q_4)。楔形体内小断裂的最新活动年代也与此相当,说明这一时期里研究区内大小断裂普遍有过活动。本区最低一级夷平面(高程1500—1600m,高出河床300m左右)形成于1.8Ma前,晚更新世 Q_2 以来形成N级以下各级阶地。

上述特征说明,大柳树坝址的岩体是一种因区域性剥蚀和河谷下切卸荷回弹造成原有构造断裂体积型拉裂错动而形成的松动岩体。有利的构造形迹和近期的构造活动促进了这种松动体的形成。

实际上,这种现象在晚近期遭受剥蚀和河谷强烈下切的构造挤压带分布区是十分普遍的。根据雅砻江桐子岭电站坝区和长江三峡黄腊石岸坡等地岸坡附近的测年资料,某些构造断裂分别记载了在地区夷平面和河谷高阶地形成过程中(1Ma—0.1Ma前)有过活动的迹象,并且多表现为粘滑(脆性破裂)特征。松动的范围和特征则因地而异,在很大程度上与构造形迹的特征、储能状况、新构造活动特征以及剥蚀、切割过程及其与构造形迹的组合情况等因素有关。

(3) 西安地裂缝(详见第三部分)

西安市地裂缝已为中外学者所瞩目,它是西安市城市建设中最大的地质灾害(图4)。西安处于渭河地堑式断陷盆地的沉降地带。该盆地是第三纪以来形成的一个构造断陷盆地,构造部位处于秦岭褶皱带与鄂尔多斯台地两构造单元的结合带。西安地裂缝发育分布在西安次断阶之上,周边为四条断层所分割:南侧的临潼—长安断层,东侧的灞河、浐河断层,西侧的泾河断层和北侧的渭河断层(图5)。地裂缝已发现有11条,具有以下主要特征:

①地裂缝均发育分布在次断阶之内新生界盖层(厚约5km)中靠近南侧;宏观展布方向为 $N70^{\circ}-80^{\circ}E$,与南侧临潼—长安断层大体平行;具等距分布特征;梁、洼地貌的延伸方向与它一致,地裂缝发育在梁、洼分界处。

②裂缝大多向南倾,上陡向下渐转缓;发育深度据已有资料可大于1000m;裂缝主要表现为张性,拉裂正错,多为南盘下降;错距随深度而增大,具继承性和同生性特征。

③地裂缝的活动具周期性、脉动性特征;活动速率由南向北逐渐减小,即随远离临潼—长安断裂方向渐减的趋势;发育的时间序列也有由南向北迁移的特点。



图4 西安地裂缝造成的破坏景观

Fig. 4 Hazard landscape by ground fissures in Xi'an city

a. 陕西省党校 b. 大雁塔南侧大雄宝殿

④西安市抽汲地下水所引起的地面沉降,均以地裂缝作为其沉降边界;沉降洼地呈椭圆形,其长轴沿两地裂缝间洼地延伸方向展布(图5)。