

彭建兵 毛彦龙 等 著
范 文 韩文峰

区域稳定 动力学研究

——黄河黑山峡大型水电工程例析



科学出版社

Science Press

区域稳定动力学研究

——黄河黑山峡大型水电工程例析

彭建兵 毛彦龙 范文 韩文峰 等著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书将区域稳定工程地质学推进到区域稳定动力学的研究层次上,构建了区域稳定动力学研究的理论体系与方法体系,以这一理论为指导,系统地研究了黄河黑山峡地区区域浅层稳定动力学逆冲推覆模式、区域深层稳定动力学流变拆离模式、区域活动构造力学走滑挤出模式、区域地震动力学共轭滑动模式和区域非稳定动力学机制模式立交镶叠模式,以及在区域非稳定动力环境下的地震工程效应分析、岩体失稳效应分析及场地稳定效应分析等一系列问题。

本书可供工程地质、地震地质、环境地质、构造地质、水电工程等专业的科技人员及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

区域稳定动力学研究:黄河黑山峡大型水电工程例析/彭建兵等著.-北京:科学出版社,2001

ISBN 7-03-009240-6

I.区… II.彭… III.动力地质学-应用-水力发电站-工程地质-研究-陕西省 IV.TV223

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第10086号

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>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2001年9月第一次印刷 印张:19.3/4 插页:4

印数:1—1 000 字数:452 000

定价:50.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

前 言

区域稳定工程地质学是工程地质学中的一门重要分支学科。20 世纪 50 年代中期刘国昌教授和谷德振教授开拓此领域以后,经 40 年来工程地质界一批有识之士的共同推进(胡海涛,1978~1993;王思敬,1982~1995;李兴唐,1982~1993;谭周地,1978~1992;王士天等,1987~1995;罗国煜等,1988~1992;杜东菊,1985~1995;殷跃平,刘传正等,1990~1994;彭建兵,1988~1998),该分支学科的理论与研究方法已渐成型。然而,随着当代自然科学和地质科学的加速发展,加之人类工程活动外延的不断扩大,区域稳定工程地质学的众多理论也不同程度地面临着新的挑战。

随着“地球动力学计划”、“国际岩石圈计划”和“大陆动力学计划”等全球性地质科学合作计划的相继实施,岩石圈结构、全球变化及地球动力学过程等已成为当代地质科学研究的三大前沿主题。岩石圈多层结构及大陆动力学的研究成果表明,现代大陆地壳构造活动是受岩石圈分层结构的大陆动力学所控制的。因此,区域稳定性研究应把现代地壳活动看成是大陆动力学过程的一部分,在研究思路和方法上,应实现由静态到动态动力学过程、地表到深层、区域到全球的转变。

在过去的岁月里,区域稳定性研究的主要目的在于选择可供工程建筑的相对稳定场区。但近些年,由于人类工程活动的空间范围不断扩大,一些稳定性很差的工程场地也不得不利用。因此,今天和今后的区域稳定性研究不再单纯是选择场地,更主要的是搞清不稳定的原因和性质,研究工程建筑如何避免和减少因不稳定因素产生的工程灾害,合理地利用场地并提出工程建筑的防灾对策。显然,区域稳定性研究应逐步实现由场地评价→场地利用→工程对策设计(地质工程设计)的转变。

当代自然科学的发展趋势是探索复杂性和学科整体化,系统论、控制论和信息论等老三论的成型和耗散结构论、突变论及协同论等老三论的出现,加之现代计算机模拟技术的发展,为区域稳定工程地质研究的系统化和定量化提供了新理论、新思维和新方法。因此,区域稳定性研究可实现由平面到多维、线性到非线性、定性到定量的研究思维方法和技术方法的转变。

基于上述背景,笔者认为区域稳定性研究应将影响区域稳定性的诸因素及其变化纳入统一的大陆动力学过程,定量地分析研究反映动力学过程的参数,阐明各种控制因素的联合、复合作用及演化中的过程序列,并探求来自地球内部系统的各种驱动力源和地球以外的驱动力源,系统地分析研究各种动力学子系统的相互影响、相互作用,以及由此而引发的各种工程效应问题。因此,区域稳定工程地质的研究应将重点转变到区域稳定动力学的研究上来。经过 10 来年多项大型工程区域稳定性研究的不断实践,笔者逐步形成了区域稳定动力学的理论与方法体系,结合笔者承担的甘肃省计委委托的黑山峡河段大型水电工程区域稳定动力学研究科研项目的实施,并结合该项目完成本人的博士论文,以黑山峡河段及外围区域的区域稳定性问题为原型,系统地开展了区域稳定动力学及其各类工程效应问题的研究,从而形成了本专著。

黄河黑山峡是黄河上游河段最后一个较长且还未开发的峡谷段。峡谷长 71km, 自甘肃靖远县大庙村入峡, 于宁夏中卫县小湾村出峡。该河段修建高坝可形成有一定反调节库容的水库, 无论对增加上游各梯级电站的发电力和保证下游灌溉用水均可发挥重大效益。因此, 国家有关部门一直十分重视该河段的开发论证工作。该河段开发方式的论证工作几乎与新中国同龄, 近 50 年来, 先后有黄河水利委员会、黄河规划委员会、原电力部北京勘测设计院、水电部西北勘测设计院、水电部四局勘测设计院、西北水电勘测设计院和水利部天津勘测设计院等单位在该河段开展过勘测、规划和设计工作, 且重点均放在小观音和大柳树两坝址上。实施钻探上千米、平硐数千米, 提交了 20 多份地质勘察、规划设计报告。20 世纪 80 年代和 90 年代围绕着两级开发(大柳树低坝、小观音高坝)还是一级开发(大柳树高坝)的开发方案论证, 先后有国家地震局地质研究所及分析预报中心、兰州地震研究所、中国科协咨询中心、中国科学院地质研究所、兰州大学、成都地质学院、西安地质学院、天津大学、中国地质大学等单位的上百名专家对该河段的工程地质问题进行过多项专题研究工作, 从而积累了大量宝贵的第一手勘测、试验和研究资料, 也为本书的研究工作奠定了良好的基础。

引起国内众多工程地质学家和地震地质学家关注的黑山峡两坝址的主要工程地质问题重点聚焦在以下几方面:

1. 区域稳定性问题: 大柳树坝址所在的地块是不稳定带中的相对安全地块还是稳定性更差的无根推覆片体? 大柳树坝址位于中卫-同心活动断裂带内还是位于带外? 离坝轴线仅 1.5km 的 F_{201} 发震断层在坝址附近是否消失? 大柳树坝址在稳定性方面是否比小观音坝址还好?

2. 坝址岩体工程地质问题: 坝址岩体拉裂、张开、破碎和松动是浅表部(100m 深以内)还是深层次大范围的(深达 300m 以上)? 它们的成因是重力作用或爆破开挖松动圈, 还是构造作用加地震动力作用的结果? 这种松动岩体可否引发边坡失稳、洞室失稳、绕坝渗漏等一系列重大工程隐患? 由此而导致的工程难度及费用追加多大?

3. 地震地质与地震工程问题: 1709 年中卫南 7.5 级地震的破裂带是否延伸到大柳树坝址附近? 大柳树坝址能否排除坝体抗断问题? 大柳树坝址是不是高烈度区?

显而易见, 上述主要工程地质问题对黑山峡河段水能开发方案的选择具有决定性的意义, 归结到工程上来, 其焦点在于大柳树坝址能不能建高坝, 若建高坝将会花多大代价, 冒多大风险?

自 1990 年开始, 笔者曾先后参与过大柳树坝址构造稳定性及松动岩体构造成因、小观音坝址区域稳定性评价及地震危险性分析等科研工作, 本次又结合博士论文更系统、更全面、更深入的进行了专题研究。

在研究过程中, 笔者一直坚持以野外第一手资料为准, 脚踏实地开展了详细的野外工作, 和其他同志一起, 辗转于黑山峡河段及其周边地区近 10 万 km^2 区域内达数年之久, 行程数千公里, 以辛勤的劳动获得了大批宝贵的实际资料和数据。

工作中, 笔者认为国内工程地质界对黑山峡水电工程的工程地质问题争论的焦点是区域稳定问题, 由此而涉及到边坡稳定、坝体稳定、洞室稳定、渗透稳定等一系列工程稳定问题。争论其所以久而不决, 各执其理, 关键是长期就坝址论坝址, 难免存在各类偏见。因此, 对黑山峡地区这类中国大陆特殊的构造活动带和地震活动带的区域稳定性

研究, 必须放大尺度, 从更大范围、更深层次、更多角度、三维立体地研究其动力学环境和动态动力学过程, 方可把握影响其区域稳定性的决定性因素及其动态变化规律。为此, 在研究过程中, 笔者自觉地运用现代地质学和现代工程地质学的新理论和新方法, 引入系统工程学、非线性科学的思维方法和现代数值模拟技术, 在前人工作的基础上, 以自己第一手工作资料为主, 从基础地质背景研究和大量实验工作入手, 以服务于国家大型工程建设为工作目标, 遵循着基础地质背景研究→区域浅层稳定动力学研究→区域深层稳定动力学研究→区域活动构造动力学研究→区域地震动力学研究→区域非稳定动力学过程及机制模式研究→区域非稳定动力学环境下的地震工程效应研究→区域非稳定动力学环境下的岩体失稳效应研究→区域非稳定动力学环境下的场地稳定效应研究的研究思路和技术路线, 详细地研究了黑山峡大型水电工程区域稳定动力学问题。从而不仅构建了区域稳定动力学研究的理论框架和方法体系, 而且成功地解剖了一个案例。本书即是这些研究成果的汇总。

本书的原型为作者的博士论文和甘肃省计委委托科研项目的研究报告, 参加该项研究的课题组成员还有兰州大学韩文峰教授, 长安大学的毛彦龙博士、范文博士及李同录博士, 全书由彭建兵执笔撰写。由于自然界吝啬地遗留给我们的只是残缺不全的记录, 因而难免“盲人摸象”般的认识悲剧在本书中重现。自身的才疏学浅又是妨碍笔者从轮廓深入到细节的一个重要因素。对此, 笔者只能期待《区域稳定动力学研究——黄河黑山峡大型水电工程例析》这块不起眼的砖石能引出精美的玉。

恳请各位专家对遗留在本书字里行间中的错误不吝批评指教。

目 录

前 言

上 篇 概论——区域稳定动力学研究的理论与方法体系

第一章 综述——从区域稳定工程地质到区域稳定动力学	(3)
第一节 区域稳定工程地质学发展历史	(3)
第二节 区域稳定动力学问题提出的思维轨迹	(8)
第二章 主题·思路·方法——区域稳定动力学研究原理	(16)
第一节 区域稳定动力学研究的主题	(16)
第二节 区域稳定动力学研究的基本原则	(30)
第三节 区域稳定动力学研究的技术路线	(35)

下 篇 工程例析——黄河黑山峡大型水电工程区域稳定动力学研究

第三章 区域浅层稳定动力学——逆冲推覆模式	(39)
第一节 黑山峡地区区域浅层构造变形样式	(39)
第二节 黑山峡地区沉积建造	(46)
第三节 黑山峡地区浅层逆冲推覆构造格局	(48)
第四节 大柳树、小观音两坝区地质构造格局	(55)
第五节 黑山峡地区浅层推覆构造形成的动力学过程及其离散元模拟	(67)
第四章 区域深层稳定动力学——流变拆离模式	(75)
第一节 区域地球物理场	(75)
第二节 区域岩石圈结构及分层动力学特征	(79)
第三节 软弱流变层剪切作用的应力放大效应的二维有限元分析	(94)
第五章 区域活动构造动力学——走滑挤出模式	(97)
第一节 区域地块活动的基本特征及其动力学背景	(97)
第二节 黑山峡地区区域活动断裂基本特征	(103)
第三节 中卫-同心活动断裂带的活动性、运动学及动力学特征	(107)
第四节 走滑挤出动力学过程的离散元模拟	(134)
第六章 区域地震动力学——共轭滑动模式	(137)
第一节 区域地震活动特征	(137)
第二节 区域地震动力学背景	(146)
第三节 地震动力学机制模式的断裂力学解释	(156)
第四节 区域地震动力学的共轭滑动模式的非线性弹塑性三维有限元分析	(167)
第七章 区域非稳定动力学的机制模式——立交镶叠模式	(174)
第一节 区域叠加构造应力场	(174)

第二节	区域非稳定动力学模式及动力学过程	(181)
第三节	区域非稳定动力学机制模式的三维黏弹性有限元分析	(186)
第八章	区域非稳定动力学环境下的地震工程效应分析	(194)
第一节	潜在震源区的划分	(194)
第二节	地震活动性参数的确定	(200)
第三节	地震动衰减规律	(203)
第四节	地震危险性分析及结果对比	(205)
第五节	场地地震反应分析	(217)
第九章	区域非稳定动力学环境下的岩体失稳效应分析	(223)
第一节	大柳树坝址岩体的基本特征	(223)
第二节	岩体松动的三维动力有限元分析	(245)
第三节	大柳树坝址右岸边坡稳定性三维有限元分析	(261)
第四节	引水洞洞脸边坡稳定性及洞室稳定性三维有限元分析	(263)
第十章	区域非稳定动力学环境下的场地稳定效应分析——大柳树与小观音两坝 址稳定性对比研究	(268)
第一节	水电工程场地稳定性研究的原则与思路	(268)
第二节	场地稳定性的神经网络分区评价	(270)
第三节	大柳树、小观音两坝址场地稳定性对比分析	(283)
参考文献		(290)
跋		
图 版	(照片 1~23)	

上 篇

概 论

——区域稳定动力学研究的理论与方法体系

只要一门科学分支能提出大量问题，它就充满着生命力，而问题的缺乏则预示着独立发展的衰亡和中止。

——希尔伯特（1900）

第一章 综 述

——从区域稳定工程地质到区域稳定动力学

区域稳定工程地质学是工程地质学中的一门重要分支学科，它是我国工程地质学家在重大工程建设场地选址实践中逐步提出和发展完善起来的。地震活动、断裂活动、火山活动、地壳形变及由此而引发的地震、地裂缝、地面沉降、边坡失稳和地基失稳等地质灾害是区域稳定工程地质研究的主要内容。避开地震活动带、断裂活动带及地质灾害区（带），减轻地质灾害，寻找相对稳定地区作为工程建设的场地和地基，是区域稳定工程地质学研究的主要目标。因此，它是一门应用性极强的重要学科，其特点是以分析研究地球内动力作用为主体，兼顾地球外动力作用，并与人类工程经济活动反馈作用相联系，重点研究工程场地由于地质活动可能引发的各种不良工程地质作用和地质灾害，预测其发生、发展规律和强度、破坏性，合理地利用、改造和有效地保护工程地质环境，使人类工程活动与工程地质环境之间协调发展。

第一节 区域稳定工程地质学发展历史

区域稳定工程地质的研究经历了孕育、产生、发展和理论成型及系统化和定量化等四个阶段。

一、20 世纪 50 年代的孕育阶段

20 世纪 50 年代随着新中国百废待兴，大规模工程建设蓬勃开展，迫切要求查明区域工程地质条件，为此我国工程地质工作者积极投入到这一建设高潮中，开展了大规模的区域工程地质的研究工作，涉及黄河、长江、松花江、新安江、海河、浑河等流域的区域工程地质工作，以及三峡、三门峡水库、官厅及密云水库、刘家峡、龙羊峡、大伙房水电站等水电工程选址的区域工程地质工作。1955 年 3 月地质部召开全国水文地质会议，会议提出要在全中国逐步开展区域工程地质工作。1957 年前后，中国区域工程地质研究形成一定气势，其中以刘国昌教授、谷德振教授和姜达权先生的研究工作成果为代表。刘国昌教授于 1957 年在《水文地质工程地质》杂志上连载其代表作“中国区域工程地质学纲要”，论文论述了中国区域工程地质的地质背景，中国区域工程地质的条件性及中国区域工程地质的分区特征，开创了我国区域工程地质研究的先河。同年，谷德振教授和姜达权高级工程师也随后在《水文地质工程地质》杂志上分别发表了“长江流域工程地质分区图的商讨”和“关于长江流域规划阶段的工程地质工作问题”等两篇著名论文，其出发点在于将区域工程地质研究与国民经济建设的规划与布局及工程场地工程地

质条件的研究结合起来,这是当时国民经济建设所必需,同时也是中国工程地质学发展的必然阶段结果。

这一期间虽然还未提出明确的区域稳定地质概念,但许多学者已对区域工程地质条件中的新构造活动、地震活动等构造稳定性问题有了足够的重视,并将地壳变动的区域性规律,作为区域工程地质分区的主要因素之一。如刘国昌教授将新构造运动定义为指第三纪末及第四纪的以垂直运动为主的地壳形变,它的发生及发展不但引起地貌改变,还可引起各种物理地质现象(如崩滑等)的发生、第四纪沉积环境的改变及地震的发生,并指出这些地质现象将影响工程建设的安全。在20世纪50年代末地质部召开的第二次全国水文地质工程地质大会上,涌现出了一大批区域工程地质研究成果,这些成果普遍认为新构造运动是区域工程地质条件中最重要、最活跃的条件之一,新构造运动活跃区常常是地震剧烈区,工程区划时必须优先考虑这一不利因素。可见,当时我国工程地质工作者已明显意识到工程场地稳定性的重要性,已经孕育了区域稳定学术思想的萌芽,并为下一个年代提出区域稳定学说奠定了学术基础。

二、20世纪60~70年代理论初生阶段

这一时期我国工程建设大规模兴起,水电工程、铁路建设、矿山开发、城市建设已由50年代的规划阶段转入到工程勘测和施工阶段,区域工程地质条件的研究已开始深入到工程建筑场地的合理选址、合理设计、施工和安全运行上来。其间,长江三峡水库及其整个长江流域的梯级水电建设进入全面勘测阶段,黄河中上游的梯级水电工程建设的勘测工作也全面展开,前者多位于西南地区的强烈地震活动区,后者多位于青藏高原东北边缘地区的强地震活动区;成昆铁路纵贯西南强震带;全国28个百万以上人口的特大城市,有87.5%位于强震区范围内,全国450个城市中的50%以上位于地震基本烈度7度或7度以上的地区。特殊的工程布局、特殊的区域工程地质条件提醒人们,工程建筑的安全稳定性问题已成为工程地质工作中的一个十分重要的研究课题。这一时期的代表性人物主要有刘国昌教授、谷德振教授和李四光教授,是他们的创新性学术思想和活跃的科学思维开创了中国区域稳定性研究的先河(谷德振,1963;刘国昌,1964,1965;李四光,1973)。刘国昌教授通过对中国区域工程地质研究和东北地区的区域稳定性论证,首次提出了区域稳定性的学术概念。其代表性成果为《辽吉东部山地区域稳定性的初步工程地质评价》(刘国昌,1964)。刘先生指出,任何建筑都存在区域稳定问题,区域稳定性研究应作为工程地质学研究的重要组成部分。60年代初,谷德振教授带领一批年轻学者进行西部南水北调引水工程地质勘察,由于该工程跨越不同的地理、地质构造单元,所经地区为我国构造活动最活跃的地区,使谷德振教授对构造活动性与工程稳定性的关系有了更深入的认识,谷先生当时明确指出应进行区域稳定性评价和研究,并强调从新构造活动、地震活动及地质构造入手分析地区稳定性。1962年3月19日新丰江水库地震发生后,谷先生组织参与了考察研究工作,其后提出该水库地震的内因是断裂发育、地壳活动性强。在这些研究工作的基础上,谷先生于1963年发表了“地质构造与工程建设”一文,明确工程建设与地质构造有密切关系,体现了区域稳定性的研究思想。李四光教授在国务活动十分繁忙之际,还十分关注我国工程建设的地质

安全因素问题,其间在他发表的一些论著中提出了工程建设应选择“相对稳定地块”或“安全岛”的学术思想。

三、20 世纪 70 年代晚期至 80 年代理论成型及发展时期

20 世纪 60 年代中期至 80 年代初期,我国相继发生了河北邢台、云南通海、四川炉霍、辽宁海城、河北唐山及四川松潘等多次 7 级以上的大震,且多分布在人口密集地区,造成了巨大的生命财产损失,极大地震动了各界人士。进一步提醒人们在从事重大工程建设时,必须考虑地壳稳定性问题,从而客观上促使了区域稳定研究领域的发展。特别是 80 年代初以后,我国经济建设迎来一个新的时期,工程建设蓬勃发展,水电、交通、能源、港口及城市建设规模越来越大,特别是核电工程的兴建、海上石油平台的建设,迫切要求开展工程区域稳定性的深入研究工作,对区域稳定研究提出了更高的要求,也加速了这一研究领域的发展。其时,我国工程地质界许多有识之士积极投身于这一领域的研究,逐步形成比较完整的区域稳定性评价理论和方法,并出现三大区域稳定理论和六大研究集体。

1. 以刘国昌教授为代表的区域稳定工程地质学理论

这一时期是刘国昌教授区域稳定工程地质学理论发展的高峰期,1975 年至 1992 年他发表了一系列重要论文和专著(刘国昌,1979、1988、1992)。在这些研究成果中,刘先生系统地提出了区域稳定研究的学术指导思想、研究内容和研究方法体系。其主要学术思想发展可分为三个阶段:初期认为“区域稳定性是指区域地壳、特别是地壳表层在新构造运动,特别是它的现代阶段中的稳定性,当然也包括由此而产生的一些区域性的物理地质作用的附加影响。更进一步讲,这里讲的区域稳定性主要导源于地球内力,如水平运动、垂直运动及地震活动”。显然,这一阶段刘先生主要注重于地球内力对区域稳定性影响的主导作用。70 年代末至 80 年代初,刘国昌教授在其所发表的论著中认为“区域稳定性主要是由于地壳运动形成的地壳水平位移、升降错动、褶曲、断裂以及地震等造成不同区域的安全程度,其次是在特定的地质条件下形成的物理地质现象(如断裂复活、滑坡、震动液化、黏土塑流、岩溶塌陷、黄土湿陷等)造成对不同区域的安全影响程度”。可见,刘先生此时不仅认识到区域稳定性与外动力地质作用有关,而且提出了区域安全度的新概念。80 年代中期以后,刘先生以西北地区特殊区域稳定问题为出发点,提出了“区域稳定是指一个区域范围内,在地球内因及外因作用下的稳定性,从工程地质的观点应称为区域稳定工程地质,区域稳定工程地质是环境工程地质的一部分”。自此以后,刘先生一直主张将区域稳定性研究,由区域地壳稳定性评价一直搞到工程场地稳定性评价上来。即将区域稳定性研究由对区域地壳稳定性评价,通过对工程建筑地区的地面稳定性分析及工程场地的地基稳定性评价,以工程地质环境稳定性为评价指标,完成对工程场地的稳定性综合评价。由此可见,刘国昌教授学术生涯的后期特别注重地壳稳定性、地面稳定性、地基稳定性的三位一体的系统研究,并将区域稳定性的研究与工程建设的安全性紧密地联系在一起。

2. 以谷德振教授为代表的构造控制论的区域地壳稳定性理论

这一阶段, 谷德振教授先后直接参与我国许多重大工程的工程地质专题研究工作, 逐步形成了他的工程地质系统学术思想。在《岩体工程地质力学基础》(谷德振, 1979)一书中, 他指出“所谓区域稳定, 就是指由Ⅰ级结构即断块体及相邻断块体的稳定程度。从广义而言, 它是指工程所在区域的地壳稳定性, 即在该区内地壳有无倾斜、拗折及升降显著变化的迹象; 有无发震构造和地震活动以及相邻地区地震活动对本区的影响”。在一系列论著中, 他一再强调的是论证区域稳定性应从地震活动与区域构造断裂的关系、区域Ⅰ级结构面的发生发展及其与派生结构面的组合关系和断块之间的相互关系入手。

3. 以胡海涛教授为代表“安全岛”理论

胡海涛教授从研究青藏铁路(格尔木—那曲段)的区域稳定性入手, 提出用地质力学的观点和方法分析区域稳定性, 并认为断裂的端点、拐点、交汇处以及构造体系的复合部位与地震带、地震密切相关。在《区域地壳稳定性工程地质图的编制及稳定性评价的原则和方法》一文中提出“区域稳定性是工程建设地区在内、外动力的作用下, 现今地壳及表层的稳定程度, 以及这种稳定程度与工程建筑之间的相互作用的影响”。更重要的是胡海涛先生坚持和发展了李四光先生的“安全岛”理论, 提出工程建设场地应选择那些相对安全的地带。经过广东大亚湾核电站、福建马尾开发区、黄河中上游水电工程等大型工程区域稳定性研究后, 胡海涛教授的安全岛区域稳定性理论得到了进一步发展和完善, 从而成为我国区域稳定论的三大学派之一(胡海涛等, 1984、1987、1991、1996)。

除了上述三大理论学派之外, 国内还有不少学者从事区域稳定工程地质方面的研究工作, 并形成了六个稳定的学术团体。第一个学术团体是刘国昌教授多年带领的长春地质学院水文地质工程地质系, 他们以三峡库首区区域稳定性研究为重点, 发展了刘国昌的学术思想, 突出的代表是谭周地教授及其学生们, 提出了区域稳定性大体分为区域地壳稳定性、区域山体稳定性和区域地面稳定性的三分说。

第二个学术团体是刘国昌教授晚期领导的西安地质学院(现长安大学)水文地质工程地质系。20世纪80年代初刘国昌教授移教于西安地质学院, 并将他的学术思想带入西北地区, 给西北地区的工程地质界注入一股活力。从此, 区域稳定工程地质研究一直成为西安地质学院的优势学科, 并培养出一批优秀人才。其中刘国昌教授的主要学术助手刘玉海教授一直协助刘国昌教授从事区域稳定工程地质研究, 并在三峡地区区域稳定性的立体研究、西安地区区域稳定性研究等方面作了一些重要的工作, 发表了大量有关区域稳定的论文, 为发展和完善刘国昌教授的学术思想作出了重要贡献。师从刘国昌教授多年的杜东菊教授, 一直从事区域稳定工程地质研究, 其研究成果主要体现在以其博士论文为基础的《秦皇岛市区域稳定工程地质》(杜东菊, 1993)的学术专著及其他一系列学术论文中。杜东菊教授在区域稳定工程地质方面的学术贡献主要表现在三个方面: 其一, 系统地提出并实现了区域地壳稳定性、地区地面稳定性、市区地基稳定性三位一体的区域稳定工程地质理论研究和评价方法的学术思想体系; 其二, 系统地确定了

区域稳定评价的指标体系，并首次建立了多级模糊综合评价计算模型，为区域稳定性的定量评价奠定了基础；三是将工程场地岩土体的动力特征因素引入区域稳定工程地质研究和评价中，从本质上解决了区域稳定分区、地震危险性分区及工程建筑安全度分区三者之间的相互关系问题。笔者则多年协助刘国昌教授和杜东菊教授从事大型工程区域稳定工程地质课题研究，主要侧重于区域岩石圈动力学、断裂活动、地震工程及有关区域稳定定量评价等方面的研究，并逐步形成了区域稳定动力学研究的理论与方法体系，其学术成果主要反映在《渭河盆地活动断裂与地质灾害》（彭建兵，1992）和《工程场地稳定性系统研究》（彭建兵，1997b）等两本学术专著及其他一些论文中。在《工程场地稳定性系统研究》一书中，笔者提出今后的区域稳定性研究应重点与工程场地的建筑适应性结合起来：一是区域稳定性转向为场地稳定性研究，重点搞清工程场地潜在不稳定因素的分布规律及成因，在此基础上预测可能出现的工程灾害的位置、类型和强度；二是根据现有工程场地的稳定条件，研究工程建筑如何避免或减少因不稳定因素引起的工程灾害，合理地规划利用场地并提出工程建筑的防灾对策，让结构工程师将工程灾害消灭在工程设计与施工之中；三是依据场地不同区块的稳定条件、可能出现的工程灾害、工程建筑适应性以及防治工程灾害的工程花费量等因素，确定场地不同区块的地价，直接服务于规划部门和投资者。因此，笔者强调的是地质环境、工程活动、人类利益三者之间的相互作用和相互协调的关系，这也是当代工程地质学追求的理想目标。

第三个学术团体是谷德振教授多年经营的中国科学院工程地质研究室。谷德振教授的工作奠定了良好的学术基础，孙广忠教授则在地应力研究和将构造控制论引入岩体地质力学中并创建了岩体结构力学理论体系等方面作了开创性的工作（孙广忠，1983、1988、1993）。王思敬教授在攀枝花场地区域稳定环境研究、秦岭造山带的区域稳定性及区域应力场的物理数学模拟等方面作出了创造性的重要贡献（王思敬等，1984、1995）。其中特别要提到的是多年一直兢兢业业地从事区域地壳稳定性研究，最后英年早逝在工作岗位上的李兴唐教授。李兴唐教授等先后发表了《渡口——西昌区域地壳稳定性评价》、《二滩坝址地壳稳定性评价》、《苏南核电站区域稳定性评价》等研究成果。1987年他出版了代表性著作《区域地壳稳定性研究理论和方法》，形成了独立的学术思想体系，其后还出版了《活动断裂研究与工程评价》（1991）一书，进一步完善了他的区域地壳稳定性理论体系。

第四个学术团体是以胡海涛教授为首的原地矿部环境地质研究所（现国土资源部环境地质研究所）。这个学术团体多年一直致力于我国重大工程场地的区域地壳稳定性研究，除了胡海涛教授的“安全岛”理论之外，殷跃平博士系统建立了“重大工程选址区域地壳稳定性评价专家系统”（殷跃平等，1992），将区域地壳稳定性研究推进到初步智能化的程度；刘传正博士则提出了“重大工程选址评价‘安全岛’多级逼近与优选理论”，进一步发展和完善了胡海涛先生的“安全岛”理论（刘传正等，1992）。

第五个学术团体是以张倬元、王士天教授为代表的成都地质学院（现成都理工学院）的工程地质研究所，他们将黄河上游龙羊峡水库区域稳定性及水库诱发地震的研究作为起点，在黄河中上游及西南一些大型水电工程选址中开展了系统的区域构造稳定性研究，系统地提出了工程场址构造稳定性研究的理论、技术路线及方法体系，并首先开展了区域构造稳定性的各类数值模拟工作（王士天等，1988、1989、1993；王士天，

1989)。

第六个学术团体是以陈庆宣院士为首的中国地质科学院地质力学研究所，他们多年一直以地质力学理论为指导，对一些重大工程和城市的区域地壳稳定性进行了深入的研究，其代表性成果有《中国地壳稳定性分区图》的编制、孙叶等《深圳市区域稳定性评价》(孙叶, 1991)、吴树仁的《清江流域地壳稳定性工程地质研究》(吴树仁, 1995)等。

显然，这一阶段区域稳定研究的理论与方法已获得较大的发展，区域稳定工程地质已从工程地质学中脱颖而出成为一门重要的独立新兴学科，并对我国工程建设具有重要的指导作用。

四、20 世纪 90 年代以来的理论系统化和定量化阶段

随着地质科学理论的不断发展和计算机技术的引入，区域稳定工程地质学的研究理论进一步系统化和定量化。本阶段发展的重要标志为三个方面：一是一系列中国区域稳定工程地质图的问世，如地质力学所主编的《中国区域地壳稳定分区图》、杜东菊等主编的《中国区域稳定工程地质分区图》，标志着我国区域稳定性研究发展到更高层次；二是新的理论体系和新的评价方法的不断问世，如杜东菊的城市区域稳定工程地质系统评价体系、彭建兵的场地稳定性系统研究体系及多级模糊综合评判加 Q 型聚类分区评价方法，以及吴树仁的信息量预测评价方法等；三是区域稳定专家系统的问世，如殷跃平的区域地壳稳定性评价专家系统及李同录的区域稳定工程地质评价专家系统等。由此可见，经过四个阶段的发展，我国区域稳定工程地质研究已逐步系统化、定量化直至初步智能化，从而进入新的发展阶段。

与我国区域稳定性研究以寻找相对稳定的区块为出发点不同，国外地震工程界或工程地质界则从寻找、评价及预测危险区入手，为工程避开危险区服务。出发点虽不同，但均为工程建设的安全性服务。然而，寻找地震危险区的方法虽然抓住了问题的关键，但却缺乏对场地稳定性的整体认识，从而造成一些不必要的损失。如因缺乏对丘陵地带地震与断层活动的地质知识，美国加州在花费了上亿元的巨资后于 1969 年取消了博德嘎海湾核反应堆计划，位于加州奥本的薄拱大坝也因断层问题被迫于 1978 年停工，结果造成巨大的经济损失。

第二节 区域稳定动力学问题提出的思维轨迹

如前所述，区域稳定工程地质学经几代人的共同努力，学科的理论与方法已渐成型。然而随着当代自然科学和地球科学的加速发展，加之人类工程活动外延的不断扩大，区域稳定工程地质学面临着三大新的问题：

1. 理论上的更新问题

多年来，区域稳定工程地质学的理论基点是李四光先生的地质力学和黄汲清先生的槽台学说。时至今日，不少有关区域稳定性论著仍以这两种理论为指导，较少运用现代

岩石圈动力学和大陆动力学的新理论。正如王思敬院士在第五届全国工程地质大会综述报告中所指出,这次大会提交的论文极少涉及到当代地球科学新理论、新方法在工程地质学中的应用问题。事实上,随着“地球动力学计划”、“国际岩石圈计划”和“大陆动力学计划”等全球性地质科学合作计划的相继实施,岩石圈结构、全球变化及大陆动力学过程等已成为当代地球科学研究的三大前沿主题。岩石圈多层结构和大陆动力学的研究成果表明,现代大陆地壳活动是受大陆动力学所控制的,并与大陆地壳不同层次的介质和构造条件密切相关。因此,区域稳定性研究应以大陆动力学理论为指导,在研究思路和方法上,实现由静态到动态动力学过程、地表到深层次、区域到全球的转变。

2. 研究目标的外延问题

在过去的岁月里,区域稳定性研究的主要目的在于选择可供工程建筑的相对稳定场区。但近些年,由于人类工程活动的空间不断扩大,易于开发且区域上比较稳定的场区越来越少,在人口密集区还出现“寸土寸金”的现象,不能仅因稳定性因素取舍场地。因此,今天和今后的区域稳定性研究不再单纯是选择场地,更重要的是搞清不稳定的原因和性质,研究工程建筑如何避免和减少因不稳定因素引起的工程破坏和灾害,合理地利用场地并提出工程建筑的防灾对策。显然,区域稳定性研究应逐步实现由场地评价→场地利用→工程对策设计(地质工程设计)的转变。

3. 思维方法的转变问题

当代自然科学的发展趋势是探索复杂性和学科整体化,系统论、控制论和信息论等老三论的成型和耗散结构论、突变论及协同论的出现,加之现代计算机模拟技术的发展,为区域稳定工程地质研究走向系统化和定量化开辟了一片新天地,提供了新思路、新思维和新方法,区域稳定性研究可实现由平面到多维、线性到非线性、定性到定量的研究思维方法和技术方法的转变。

基于这些背景,笔者提出了区域稳定动力学问题,并一直在围绕着区域稳定动力学理论问题、区域稳定动力学各类数值模拟以及区域非稳定动力学环境下的工程反应及工程对策等一系列重大问题进行深入思考,现对这一思维轨迹作一详述。

一、当代地球科学新进展的启示

工程地质学是脱胎于地质学的一门分支学科,地质学的新进展推动着工程地质学的发展,一个有见识的工程地质学家务必站在当代地球科学的前沿,密切关注地球科学发展的新动向,并不断地学习、消化、吸收和应用当代地球科学的新理论和新方法。笔者正是在追踪当代地球科学新发展时,不断获得启示和灵感,从而提出区域稳定动力学问题的。

1. 上地幔动力学过程的启示

近些年,对上地幔物质的各向异性、物质上涌及低速高导层的动力学性质及过程进行了大量的研究工作,并取得了令人瞩目的进展(Adam, 1987; Akimoto et al., 1987;