

复杂环境中地质工程问题 分析的理论与实践

王士天 等著

四川大学出版社

责任编辑：张春燕 王 平
责任校对：王 平
封面设计：康继飞
责任印刷：李 平

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂环境中地质工程问题分析的理论与实践/王士天
等著. —成都: 四川大学出版社, 2002.2
ISBN 7-5614-2287-3

I. 复… II. 王… III. 工程地质—分析
IV. P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 008751 号

书名 复杂环境中地质工程问题分析的理论与实践

作 者 王士天 等
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
印 刷 西南冶金地质印刷厂
发 行 四川大学出版社
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 19.25
字 数 460 千字
版 次 2002 年 2 月第 1 版
印 次 2002 年 2 月第 1 次印刷
印 数 001—500 册
定 价 50.00 元

版权所有◆侵权必究

◆读者邮购本书, 请与本社发行科联系
电话: 5412526/5414115/5412212
邮编: 610064
◆本社图书如有印装质量问题, 请寄回
印刷厂调换

前 言

王士天教授是我国著名的工程地质学家。他 1956 年毕业于苏联列宁格勒矿业学院地质系,1957 年到成都理工大学(前成都地质学院)任教,1987 年 2 月晋升为教授,1990 年 10 月由国务院学位委员会增列为博士生导师,是成都理工大学工程地质学科的奠基人,也是成都理工大学“地质工程”国家级重点学科的主要学术带头人之一。在数十年从教经历中,他为人师表、授业有方、奖掖后学、桃李满天,为师堪称一代学范;他知识渊博、才思敏捷、脚踏实地、治学严谨,善于从复杂的表象中把握事物的本质,善于从纷繁的现象中总结出事物发展的客观规律,更善于理论结合实际,针对具体问题发表真知灼见,为学堪称一代大师;他为人坦诚,心胸豁达,实事求是,敢于坚持原则,为人堪称一代楷模。在从业近 50 年的时间里,不仅为我国工程地质事业培养了一大批高层次人才,而且在区域构造稳定性、岩体稳定性及地质灾害防治等领域取得了突出成就,为推动我国工程地质事业的发展作出了卓越的贡献。

王士天教授是我国工程地质界区域构造稳定研究的开拓者之一。早在 20 世纪 70 年代,他就在利用赤平投影进行断层面机制解方面作出了重要的理论与方法贡献。从 80 年代开始的整整 20 年时间里,他结合我国西南西北地区一系列大型水电工程建设,系统地探索了青藏高原隆升这一复杂地质背景下,我国西部地区活动性构造的发育分布规律、强震发震机理以及包括水库诱发地震在内的工程环境效应。80 年代初期,结合龙羊峡水电站的修建,他创造性地提出了活动性构造对区域稳定性控制的“调节阀机制”,从而系统地阐明了青海东部地区区域构造稳定性的基本格局与本质规律;据此,对龙羊峡大型水电工程的水库诱发地震问题给出了明确结论,并为后期的工程监测所证实。80 年代中后期开始,他结合西南地区锦屏、溪洛渡、铜街子、官地等大型水电工程建设以及国家自然科学基金重点和面上项目,着重研究了川滇南北向构造带北段和中段的区域构造稳定性问题,对鲜水河、安宁河等我国著名的活动性断裂带进行了深入的解剖,提出了强震发震的“构造楔机制”,并通过系统的数值模拟,阐明了这一地区形变—应力场的基本特征及相关的强震迁移规律。90 年代中期以来,他将工作重点放到了川滇南北带的南段,结合小湾、虎跳峡等大型水电工程建设,对滇东北和滇西南地区的区域构造稳定性进行了深入研究,纠正了长期以来学术界对玉龙雪山东西两侧断层倾向问题的错误认识,并创造性地提出了丽江地震的“正断”发震机理模式。在总结多年研究成果的基础上,王士天教授对我国环青藏高原周边地带的地球表层动力学模型进行了系统而又精辟的总结与论述,提出了中国西部地区晚近期以来构造形变—应力场发展与演化的 5 个阶段(期次)理论;以此为基础,通过对我国已有水库诱发地震的类型、特征及其产生的地质环境条件的系统对比分析和对典型实例的深入解剖,提出了我国水库诱发地震成因机制的新认识,首次揭示了我国水库诱发地震的主震强度与所处环境条件及工程规模间的复杂相关关系,获得了水库诱发地震主震强度的预测公式,从而使水库诱发

地震产生可能性及其主震强度的预测成为可能。

王士天教授在边坡工程及崩滑地质灾害防治领域同样有丰富的建树。70年代在新疆大山口水电站,他就在国内首次揭示了层状岩体在地表条件下的流动变形特征,即后来命名的滑移—弯曲变形破坏。80年代初期的洒勒山滑坡,促使他对高速滑坡的机理进行了深入的思考,提出了高速滑坡启动的“滑动铲机理”,并对经典的滑坡时间预报模型进行了改进,提出了修正的斋藤公式;通过对发育于花岗岩中的大型岩质滑坡研究,提出了岩质滑坡高速远程滑动的“滚动摩擦机制”。80年代中后期开始,王士天教授主要结合大型工程建设进行有关岩质高边坡变形破坏机理及稳定性评价方面的研究。在拉西瓦水电站坝区,他揭示了高地应力环境下发育于块状花岗岩体中的一系列高边坡表生改造结构与时效变形现象,从而为这类边坡的稳定性分析提供了坚实的工程地质基础;在金沙江向家坝水电站近坝库岸,针对层状岩体高边坡的深部裂缝,他提出了“应力释放型”表生改造的深部裂缝形成机理,从而合理地解释了在近水平的层状结构岩体边坡中,这类现象产生的内在地质—力学本质,有力地阐明了与之相联系的近坝库岸马布坎高边坡稳定性这一制约工程修建可行性的关键技术问题,获得工程勘测设计部门高度的评价与赞誉。同样是岩质高边坡深部裂缝问题,雅砻江锦屏水电站左岸高边坡的情形要复杂得多,在周密的现场调查基础上,他提出了高陡岩质边坡在强卸荷条件下的表生改造与时效变形机理。又如小湾水电站左岸高边坡、糯扎渡水电站右岸高边坡、李家峡水电站 I、II 号变形体……诸如此类结合工程实际的边坡稳定性问题,王士天教授主持和参与解决的达十余项之多。90年代中后期,随着我国对地质灾害防治工作的日益重视,王士天教授多次被邀请参加了西南地区及长江三峡库区一系列重大地质灾害防治工程的评价与咨询工作,在所有参加过的数十项不同阶段的地质灾害防治工程中,他都以敏锐的洞察力发现问题,以严谨求实的科学态度分析问题,以实事求是的工作作风解决问题,赢得了有关工程勘察、设计及施工部门的高度评价和崇敬。

王士天教授还是我国早期岩溶工程地质研究的开拓者之一。早在 60 年代,他就结合西南地区工程建设和水资源开发,在岩溶(喀斯特)基本理论和实际工程应用方面取得了重要的研究成果。如从喀斯特水和喀斯特通道之间的矛盾关系,探讨喀斯特作用发展的基本动力,从喀斯特水循环交替条件及其变化讨论喀斯特的发育特征和空间分布规律,从喀斯特发育过程中的分异规律探讨喀斯特“特殊含水层”的形成机理,从地质发展史、地形形成史以及喀斯特水排水区的空间变化、更迭规律等方面划分喀斯特发育阶段等。同时,将这些理论应用于水电工程建设的岩溶渗漏问题,如贵州乌江渡水电站、广西都安水利工程、雅砻江官地水电站等。

在长期的科学研究和高层次人才培养实践中,王士天教授极力倡导新理论、新技术、新方法的引进及学科的交叉与渗透。80年代开始,他就带领研究生开展数值模拟技术应用于边坡稳定性分析的研究,并先后在河谷应力场的反演与边坡应力场分析、边坡变形破坏全过程数值模拟等领域取得重要的研究进展。在他的极力鼓励与倡导下,成都理工大学在数值模拟技术的应用方面一直处于国内的领先地位。在技术应用上,他最早将甚低频电磁仪、氦气(卡辐射)测量等技术应用于活动性断裂的调查中,最早在国内开展声发射技术测定地应力的研究。特别值得一提的是,在遥感技术应用方面,他不仅将其在活动性断裂调查中的应用发挥到了很高的水平,而且,开拓了应用遥感技术进行新断裂体系的研究,并将之进一步扩大到有关水文地质参数的评价。

王士天教授还是一位优秀的工程地质教育家,他与张倬元教授等老一辈工程地质学家一起,共同创立了成都理工大学“地质工程”国家级重点学科这块品牌;并本着博大的胸怀,培养和造就了成都理工大学地质工程一批优秀的中青年学术带头人和朝气蓬勃、团结向上的学术梯队,从而保持了这一学科持续不断的发展与壮大。在他所培养的研究生中,有的在勘测设计部门担当技术重任,有的已成为高校的教授、博士生导师、学术带头人等,更有的已成为我国工程地质界知名的优秀青年学者。他为主编之一的《工程地质分析原理》已被公认为我国工程地质领域的经典之作,被多次再版和大量的参考、引用。由于在教学领域的杰出贡献,他两次获得国家级优秀教学成果二等奖和省部级优秀教学成果一等奖。

王士天教授著述颇丰、硕果累累。在长期的科研实践中,共发表专著 7 部,合作译著 7 部,在国际学术会议及国内高级别刊物上发表论文百余篇。他还多次获得省部级科研奖励,包括部级科技成果一等奖 1 项、二等奖 3 项、省部级科技成果三等奖 5 项。

在老师从事地质工作 50 年之际,作为他的学生们,回顾老师多年教学、科研工作所取得的成就,崇敬之情油然而起。我们这些广受先生恩泽的学生,除了衷心祝福他幸福平安、永葆青春之外,更重要的是要把先生的师风师德继承下来、传扬下去,为国家建设培养出更多的优秀人才,为工程地质事业作出更大的贡献。

黄润秋等全体弟子敬贺

2002.3.3

目 录

第一部分 区域地壳稳定性研究

- 区域地壳稳定性问题研究现状····· (3)
- 工程建设地区区域稳定性评价 ····· (10)
- 断层错动机制和构造应力场的赤平投影解及其在区域稳定研究中的应用 ····· (16)
- 光学信息增强处理遥感图像在解译新断裂网络等地学问题中的应用 ····· (34)
- 黄河龙羊峡电站区域构造稳定性的工程地质研究 ····· (42)
- On the methods of investigation in sesmo - tectonic problems in the area of Longyang Gorge Hydro - electrical Power Station, China ····· (52)
- Engineering geological study of regional tectonic stability in the area of the Xiluodu hydroelectrical power staton on the Jinsha river, China ····· (67)
- 澜沧江小湾电站区域构造稳定性数值模拟研究 ····· (74)
- Research on the present activity and seismogenetic model of Anning River Fault in the western part of Sichuan Province ····· (98)
- 龙门山北段及其邻近区域的地应力场和现代构造活动的基本特征··· (105)
- 虎跳峡地区新生代以来应力场演化及断裂新活动性探讨····· (113)

第二部分 工程岩体稳定性及地质灾害防治研究

- 从第四届国际滑坡会议看滑坡研究的进展和动向····· (120)
- 开展模式机制研究提高地质灾害研究水平····· (127)
- 地表条件下岩体的粘性流动变形及其所导致的斜坡破坏····· (130)
- 洒勒山高速滑坡的基本特征及动力学机制····· (138)
- 成渝公路 0 + 22km 滑坡概况及整治对策讨论····· (147)
- 四川某水库大坝左坝肩边坡变形破坏机制及整治对策探讨····· (151)
- Deformation mechanism of Mabukan high - slope in Xiangjiaba hydro - electrical Power station, China ····· (156)

西藏自治区波密县易贡崩塌—高速滑坡发育的基本特征及成因 机制研究·····	(162)
尼泊尔色迪河大桥桥址区岸坡岩体变形破坏问题的考察报告·····	(176)
Reswarch on the time - dependent deformation fractures at damsite, Sichuan, China ·····	(187)
 第三部分 水岩相互作用研究	
大型水域水岩相互作用及其环境效应研究·····	(195)
大渡河铜街子电站水库诱发地震研究·····	(214)
中国水库诱发地震的成因机制和预测评价研究·····	(242)
 第四部分 岩溶(喀斯特)基本理论及应用研究	
喀斯特研究中某些基本问题的初步探讨(以川东和黔西为例)·····	(257)
喀斯特水动力特征的形成问题·····	(270)
官地水电站库首左岸单薄分水岭地段岩溶发育特征·····	(285)
 附 录·····	 (295)

第一部分

区域地壳稳定性研究

区域地壳稳定性问题研究现状^①

近几年来,我国区域地壳稳定性研究工作的发展,一方面是由于一些大型工程建设的推动,另一方面是与防震抗震斗争的实践密切相关。我国从1966年以来相继在邢台(1966)、通海(1970)、炉霍(1973)、海城(1975)、唐山(1976)、松潘(1976)、澜沧(1988)等人口稠密区发生了6级以上的强震,这一地震活动高潮期的到来,促使我国的地震研究工作进入到一个以地震预报实践为特点的新阶段。

一、地应力及现今区域地应力场的研究

近十多年来,为满足抗震防灾和大型工程建设规划设计的需要,我国不同部门在这方面进行了大量的研究工作,取得了重要进展。

(1)在研究的手段和方法方面突出地表现在两个方面:一是水力压裂测定地应力法的开发和应用使直接测定深部地应力成为可能,从而为研究和解决区域构造稳定性问题提供了重要的研究手段;二是通过采用多种方法进行综合研究的途径,已使区域地应力场的研究向更加科学化和定量化方向迈进了一大步。近年来,应用于研究区域地应力场的方法很多,包括新断裂网络地质地貌解析法,地应力、地形变测量法,断层错动机制和震源机制解析法以及物理、数值模拟研究等。值得指出的是,目前通过物理和数值模拟研究,不仅可以根据区内一些点的应力实测资料反演现今区域地应力场,建立其现状的定量化模型,取得不同地段在应力—形变强度和发震能力方面的定量关系,而且还可以通过改变外力或边界条件的系统分析,深入研究区域地应力场的形成演化机制以及区域断裂活动和应力转移的规律,为定量评价区内不同地段的构造稳定性提供了充分的科学依据。

(2)由于研究资料的积累,目前已对我国地壳岩体内天然应力状态的类型和特征,地应力场的空间分布和局部应力集中的规律以及它们与区域构造稳定性的关系,有了较为完整、深入的认识。已有的研究表明,我国境内现今地应力场的发育主要有以下特征:

①各地最大主应力方向的分布呈明显的规律性,即各点的最大主应力方向均与由各该点向我国的察隅和巴基斯坦的伊斯兰堡连线所构成的夹角等分线方向相吻合或相近似,仅在两侧边缘地带略有偏转(靠近察隅一侧顺时针方向,靠近伊斯兰堡一侧反时针方向)。

②三向应力状态及由其所决定的现代构造活动的类型呈有规律的空间分带。潜在逆断

^① 本文作者:王士天(成都理工大学)

型应力状态区主要分布于喜马拉雅山前缘一带,其特点是两个水平主应力均大于垂直主应力,是强烈水平挤压区的特征,区内的活断层及地震也多具逆断性质。潜在走滑型应力状态区主要分布在我国中西部广大地区,其特点是只有一个水平主应力大于垂直主应力,呈中等挤压区的特征,区域最大主应力一般在 20MPa ~ 30MPa,区内众多的大型左旋走滑型活断层及伴生的地震就是此类应力场下的产物。潜在正断型或张剪走滑型应力状态区主要分布于我国的东部地区,其特点是随着水平挤压的进一步减弱,区域最大主应力只有几帕(Pa)或更低,而最小主应力则变为拉应力,且在岩体变形破坏中起主导作用,故区内的活断层及伴生的地震多为正断型(老第三纪时期)或张剪走滑型(新第三纪以来)。

应该指出,以上所述仍是一般规律,因局部条件而产生的异常情况也是存在的。地应力场规律性发育的内在原因,涉及到地壳运动方式和区域构造力的来源问题。目前对于这方面问题的认识尽管尚有不同的观点,但上述事实却清楚地表明我国,特别是西部地区的地应力场和现代构造活动,主要是由印度和欧亚两大大陆板块相互碰撞、挤压所产生的。研究表明,上述两大板块是始新世末,即大约 3 800 万年前板块间的相互碰撞而出现的,此后印度板块仍以每年约 5cm 的速度向 NNE 方向推进,强力地推挤着欧亚板块。察隅及伊斯兰堡恰位于两板块接触带的两个端点附近,如果在两板块相互碰撞、挤压的过程中,欧亚板块所产生的仅是弹性变形,则根据弹性理论可知,欧亚板块内各点的最大主应力方向将严格等于各该点与两板块挤压接触边界两端点连线的夹角等分线方向。但由于在碰撞挤压过程中欧亚板块内产生了塑性或粘性流动变形,致使两侧边缘部位的最大主应力方向发生了有规律的偏转。因此,最大主应力方向的规律性分布,反过来又为我国地应力场的上述形成机制提供了一个有力的证据。不仅如此,应用莫尔纳等人所提出的与大陆板块碰撞相联系的滑线场理论,还可进一步从定量方面统一地解释我国地应力场空间发育的上述规律性问题。

二、区域地壳结构及活动性断裂的研究

地壳岩体是一种被各类断裂所切割的、极不均质的非连续性介质。按其发育规模及影响深度,通常将切割地壳岩体的断裂分为岩石圈断裂、地壳断裂、基底断裂、盖层断裂和表层断裂等五类。其中前三类属深大断裂型,在长期的地质演化中,这些深大断裂通常都有多期的重复活动历史,是地壳岩体中联结最薄弱之处,因而也是最易于活动和不良地质作用沿之集中发育的部位。被这类活动性深大断裂所组合切割的地壳岩体,往往具有复杂的“块断结构”。大陆地壳内的这类断块结构及其最新活动性就是控制区域稳定性的最基本因素,而深入研究这类活动性断裂则是解决区域地壳稳定性评价的基础。多年来的实践,已使活断层的研究有了很大的进展,主要表现在以下几个方面:

(1)对潜在活断层的判定已有明确的标准。按活动特点,活断层可以分为正在活动的和潜在活断层两种类型。长期以来,国内外对怎样判定潜在活断层有不同的认识。通过近些年的研究,目前在我国地震地质界,水利水电建设部和工业民用建筑部已分别将 Q_2 以来, Q_3 以来和 Q_4 以来有过活动的断层定义为潜在活断层。这样的判定标准既考虑了人类工程活动对地质环境的影响程度,又兼顾了安全与经济的原则,具有一定的先进性。

(2)对多种手段的综合研究方法的开发和应用,提高了对活断层研究的效率、精度和深

度。近些年来的实践表明,配合使用计算机处理的遥感图像、甚低频电磁法测量或静电 α 卡测量对查明新断裂和活断层的发育分布十分有效。前者,因能清晰地反映出各类控制地形、水系发育的新断裂和活断层的发育分布,使研究者能从宏观方面纵观全貌,故在现场调研中可起重要的导向作用;而后两者不仅可有效地探测地表附近产出的新断裂和活断层的分布,还可以探测 50m~60m(甚低频法)或更厚(静电 α 卡法)覆盖层下的活断层,为现场查证提供了有效的手段。两者配合使用,可较大地提高调研工作的效率和精度。

开挖探槽,研究上覆第四系沉积物被错断的性质、特征和幅度,是查明断层区新活动性的重要手段。实践证明,通过仔细观察、对比和分析剖面上不同形式和不同阶段变形破坏所产生的现象并取得相应的年代数据,就可正确地阐明该活断层的晚近活动历史,估算其历史平均错动效率、最大的发震强度和重复活动周期,为评价其近期发震危险性取得重要依据。例如刘百箴等人根据对海原活断层上探槽剖面的详细研究,确定出全新世以来沿该断层发生过 5 次 8.5 级左右的大地震,其历史平均错动速率为 3.04mm/a,大震的平均重现期为 2 325 年,进一步深化了活断层的研究。

根据采样测定断层最后一次活动的绝对年代时域,对鉴别活断层及近期活动危险性的存在有重要意义。目前常用的方法有 ^{14}C 法、热释光法、铀系法、电子自旋共振及裂变径迹法等。李兴唐和许学汉两人的文章介绍了这些方法的应用条件,并对活动性断层工程地质评价原则进行了有趣的讨论。除上述测年的一些方法外,近年来还发展了一种可根据断层带内石英碎砾表面结构特征来判断断层最新活动年代的方法(扫描电镜研究)。大量实践表明,在我国一般条件下,可将石英碎砾表面具有新鲜的贝壳状或次贝壳状断口或张裂网络作为活断层(Q_3 以来活动过)的判断依据。值得指出的是,此法虽不能给出断层最新活动的绝对年代数据,但因方法简便易行,且所得定性结论十分可靠,仍不失为一种初步筛选活断层的好方法。

断层活动性的监测是研究活断层的重要手段。根据监测资料可以阐明断层的现今活动方式和活动量级,将这些资料与其他研究结果(历史平均错动速率、重复活动周期和最后一次活动年代等)相互对比,还可以判明断层现今是否处于孕震状态及近期发震危险性之中。特别值得指出的是,近些年来通过水准及基线测量,发现一些断层,如深圳的罗湖断裂和北京的八宝山断裂等,其两盘相对运动的轨迹呈既有相对升降又有水平扭动的往复运动形式,似乎表明这些断层是处于往复错动着的状态。为论证八宝山断层对我国 BEPC 工程的影响,建设部综合勘察研究所对八宝山断层的“蠕动”问题进行了进一步研究,孙毅的文章报导了研究的结果;王钟琦也根据这些研究资料更明确地得出结论,认为三角测量资料所反映的往复蠕动,并不是该断层的实际运动,而是断层两侧表面岩土体在温度或湿度变化影响下的体积胀、缩变形,不具有工程意义。深圳罗湖断裂层上的大量建筑物多年来未发现任何变形破坏迹象,也证明了这一点。

(3)对我国的一些重点地区活断层的区域性发育分布特征、组合模式及其与构造应力集中和地震的关系,有了较为深入的认识。这些研究表明,活断层本来就是现代地应力场中应力集中程度较高的断裂带,同时它的持续活动又将导致其附近地区的应力进一步重新分布。所以在活断层或活动断块的特定部位,往往形成很高的局部构造应力集中区。局部压应力集中区通常是在近代的隆起和推挤型构造的形成地带,往往伴有逆断型强震活动;而局部拉应力集中区则常是近代的拗陷和拉分型构造的形成地带,有时则伴有正断机制的地震。由

于上述机制的制导,活断层的结构和形态在其累进性的发展中不断地趋于复杂化,除在其错列段或锁固段附近形成次级推挤型或拉分型构造外,还常在其端部产生张性或压性折尾现象。反过来,这样所产生的地貌现象和结构特征,又可帮助判别活断层的发育阶段、活动方式乃至强震的可能发生部位。

(4)对我国少数的一些区域性活断层(如红河断裂、海原断裂、贺兰山前断裂、可可托海二台断裂及喀什断裂等)的晚近活动历史及其定量参数,包括历史平均错动速率、发震历史、最大震级及其重现周期等的研究也取得了重要进展。但总的看来,我国目前对活断层的研究,特别是对其晚近活动历史及定量参数的研究,与先进国家相比还有一定差距。加强这方面的研究,对于区域构造稳定性研究来说具有十分重要的意义,因为不搞清楚这方面的问题,实际上是难于对活断层作出有根据的工程地质评价的。

三、地震的研究

多年来,我国广大科学工作者在地震研究方面作了大量的工作,并且已在强震发生的构造条件、震源物理过程及地震活动的规律性、地震前兆和地震预报、地震危险性分析、地震效应及地震小区划分、地震危害估价和地震工程等方面取得了很大的进展。但从区域构造稳定性工程地质研究的角度来看,值得着重指出的有以下两个方面。

(1)近些年来,由于活断层研究水平的提高和地震定位技术的进步,人们已对地震与活断层的关系有了更清晰、更深刻的认识:

①地震是粘滑性活断层的产物,其强度与活断层变化规模有密切的关系。已有的统计资料表明,我国8级以上的地震共有18次,均发生在长达数百千米的深大断裂带上;7级~7.9级地震共有75次,大多发生在长度大于100km的深大断裂带上;6级~6.9级地震共有349次,其中90%以上发生在长度大于10km的深大断裂带上。总的看来,这些产生6级以上强震的断裂通常都属于岩石圈断裂或地壳断裂。而与基底断裂、盖层断裂和表层断裂的活动相联系的地震,其强度一般分别不超过6级、5级和3级。在对地震强度与活断层规模两者关系的研究方面,除通过统计得出上述一些定性概念之外,许多研究者还对其间的定量关系进行了研究,得出了一些有区域性的统计关系式,可作为估计最大震级的参考。

②强震都发生在这类活动性断裂的应力易于集中的特定部位,诸如与其他方向断裂的交汇复合部位、活动性断裂的转折部位、端部或其他锁固段附近等。

③强震的重复活动周期 R_r 取决于活断层的历史平均错动速率 S 和单一错距 D ,即 $R_r = \frac{D}{S}$ 。

(2)地震危险性分析和地震小区划分是与区域构造稳定性定量评价有关的重要问题,近年来的发展尤为迅速。在地震危险性分析和评价方面,我国目前所采用的方法主要有两类:一类是以确定性的分析方法为基础的地震基本烈度鉴定法,其要点是在深入的地震地质研究的基础上分析确定已选场地附近发震断层的分布及强震可能发生的部位和震级,并根据地震烈度的衰减规律及场地距可能震中的距离来确定场地的基本烈度,目前这种方法的可靠性已因活断层研究水平的提高和现代模拟研究技术的开发和应用而得到显著的改善。另

一类是以概率分析为基础的地震危险性分析方法,其要点是:

①根据地震地质研究,首先将工程场地周围半径 320km 范围内的未来可能发生较强地震的潜在震源区划分出来。

②统计确定各潜在震源区的地震活动参数,包括震级上限、地震年发生率和震级—频度关系参数 b 值等。

③用回归分析方法确定适合于研究区的地震衰减关系和破裂长度—震级关系。

④建立概率统计模型,计算工程场地在不同年限、不同超越概率的地震动参数和反应谱曲线。这种方法,由于把地震的发生和对一个场地所产生的影响都看作是一种随机现象,且把潜在震源区内可能出现的对工程有影响的所有地震对场地的影响都给予了考虑,比较符合实际,同时又能直接给出抗震设计所需的参数。这种方法在国际上已得到广泛的应用,我国目前已逐渐向采用这种方法的方向过渡。李敏等人的论文,系统地讨论了这种方法在福建永定水电站坝区地震危险性评价中的应用。

上述地震危险性分析所给出的是对一个场地遭受地震动作用的平均水平的估计,没有涉及到场地局部条件的影响。为了将局部场地条件的影响反映到抗震设计中去,所采用的方法也主要有两类:一类是根据地质条件的差异调整场地烈度,即所谓的地震烈度小区划分法;另一类是以土层的地震反应分析为基础的地震小区划分法。

以场地内土质和地下水埋深条件的不同来增减烈度的地震烈度小区划分法是苏联学派所采用的方法,于 20 世纪 50 年代我国曾试用过后,因与其实际不符而停止采用。近年来,一些新方法(包括平均剪切模量法和易损性分析法等)的开发和应用虽已使这类方法的适用性得到了一定程度的改善,但仍然未能得到进一步的推广。以土层的地震反应分析为基础的地震小区划分法,目前在我国已得到了广泛的应用,它的要点就是以地震危险概率分析所得到的反应谱为基础,对场地内一些典型的土层剖面进行地震反应分析,然后根据所得结果,将场地按地震反应划分为不同的区,并分别给出设计用反应谱,作为抗震设防的依据。金华的论文讨论了这种方法在实际应用中的一些问题,并评价了各种反应计算方法的适用性,具有参考借鉴意义。

四、水库诱发地震的研究

早在 20 世纪 30 年代,人们就注意到水库蓄水可以引起异常的地震活动,然而直到 60 年代当世界上相继发生了几次 6 级以上的破坏性水库地震之后,国内外学者们才开始重视并着手对其进行系统的研究。早期的研究,主要集中在已有水库地震实例特征的对比分析、发生条件及成因机制的探讨等方面。近些年来,随着资料的积累,水库地震的研究已有了新的发展,主要表现在以下三个方面。

(1)一些研究者试图应用统计学、模糊数学和岩体水力学的方法及数值模拟技术来解决水库地震的定量预测问题。例如美国的 G. B. Beacher 等人(1982)根据世界上 29 座发震水库和 205 座未发震水库资料的统计分析,提出预测水库能否诱发地震的概率模型;我国陶振宇等人(1987)以固体—液体两相介质相互作用的耦合分析为基础,提出了水库诱发地震定量预测的概念模型,并据以对三峡水库诱发地震的可能性、强度及时间进行了预测;谭周地等

人的论文根据世界上 65 座诱震水库资料的统计分析,参照 G. B. Beacher 等提出的诱震因素,应用概率统计中的贝叶斯定理,提出了水库地震发震强度的概率预测模型,并据此对拟建三峡水库的可能诱震强度进行了初步预测。

(2)对水库地震的诱发机制又陆续提出了一些新的见解。例如金春山提出了水库地震的扩容—水击模式;李智毅等提出了扩容—沟通模式。两者都强调了高异常空隙流体压力的形成在诱发地震中的作用。

(3)20 世纪 80 年代以来,我国一些单位在总结国内外大量震例经验的基础上,对三峡、二滩、龙羊峡、龙滩、百色、小浪底等重大工程,进行了系统的水库诱发地震前期论证工作,通过对区域地震地质背景和具体诱震条件的研究,为各工程提出了具体的预测评价意见,这在水库地震的前期论证和评价方面走在世界前列。然而总的看来,这些工作都还处于探索阶段,在研究思路、工作程序和评价方法上存在许多不同之处,缺乏统一的客观标准。夏其发、汪雍熙等人的论文,结合三峡水库诱发地震的实际预测评价,讨论了应用地震工程学的方法进行水库诱发地震危险性评价的途径和方法,力图使研究、评价方法(既不以解决诱发地震发生的机理和预报等重大理论问题为其前提条件,又能随时容纳研究中的最新成果,且在科学发展的每一阶段的认识水平上,都具有必要和合理的安全裕度,相对的客观性和较大范围内的可比性,且便于工程单位使用)具有较大的参考价值。

总的看来,水库诱发地震的研究,目前国内外都还处于资料积累和探索阶段,对于诱发地震的产生条件、成因机制和预测评价方法虽然有了一些研究成果,但还没有形成比较成熟的、在实践中得到验证的理论和方法,还有待进一步研究、解决。

五、区域地壳稳定性的研究途径和方法

随着区域地壳稳定性研究经验的积累和技术的不断进步,在研究的途径和方法方面也经历了一个不断发展的过程。早期的研究是以条件和现象的观察描述为基础,通过地质分析得出一些定性评价的结论,为工程的规划和设计提供依据,可称之为“现象描述—定性评价”研究阶段。之后,一些研究者在总结已有经验和深入分析影响区域地壳稳定性各项因素的基础上,提出了一种以一定的理论概念(如安全岛)为指导,以多项指标的综合判别为手段,通过多级区划和编制相应图件来实现区域稳定性的半定量评价的研究途径。这一研究途径和方法,后来又有了—些新的补充和发展。

近年来,新技术新方法的开发和应用,使区域稳定性研究工作在研究的途径和方法方面又有了新的发展,一种以“模式机制研究—定量评价”为特点的研究途径正在形成。这一研究途径的基本要点是在分析区域资料及对重点地区各种新构造运动现象(包括新断裂、活断层、地震及地应力等),在深入调查研究 and 测试的基础上,正确地抽象出研究区由特定地壳运动方式所决定的应力—形变场发育的基本模式,然后通过物理模拟和数值模拟研究,深化对作用机制和区域规律的理解,取得定量关系和数据,进而采用现代的理论和方法(例如概率分析方法),对区内不同地段的构造稳定性进行定量评价。原成都地质学院已在龙羊峡地区,原地矿部系统的一些生产、科研和教学单位在深圳特区,以及西安地质学院在秦皇岛市区所进行的区域地壳稳定性研究工作可作为这方面的代表。实践表明,这一研究途径和方

法的应用,不仅可使区域稳定研究工作向科学化、定量化方向前进一步,而且还能从本质上揭示活动带和稳定区的空间分布以及发展演化的机制和规律,为区域稳定性定量评价奠定坚实的理论基础。

我国区域地壳稳定性研究工作,虽已取得了较大进展,但从总体来看,目前对于区域条件的研究程度还较低,特别是活断层的研究,除少数深入外,大多比较粗糙,而已有的一些定性判断结论尚不足以作为区域稳定性评价的依据。因此,每一具体区域稳定性问题的评价都必须对基础条件,特别是活断层和地震的深入研究为基础,采用正确的研究途径和方法,对于具体问题具体分析地加以研究和解决。

工程建设地区区域稳定性评价^①

我国是一个新构造活动比较活跃,地震发生频繁而强烈的国家。因此,进行各类大型工程建设,首先遇到的是活断层、地震及水库诱发地震等对拟建建筑物及周围环境的可能发生危害的问题。这类问题可统称之为区域构造稳定性问题,研究与评价它们,不仅是具体工程建设的规划和设计所必需,而且对于地质环境的合理开发和妥善保护具有重要意义。

近年来区域稳定性研究工作中的一些重要进展和动向简要评述如下。

一、现象调查

(一)认识方面的进展

新构造活动现象的调查是研究与解决区域构造稳定性问题的基础。

大面积升降运动和差异性断裂活动及伴生地震是现代构造的两个不同侧面。传统地质学认为大面积升降运动是由地壳的均衡代偿作用所控制的,而现代的一些研究者则强调这种运动是地壳遭受水平挤压的侧膨胀反应。按照后一种观点,由于地壳的隆起(或沉降)和沿断裂带的应力积累是同源同步的,故有时可将地壳的隆起或沉降速度作为判断区域地震活动性的有用指标。据统计,一般地壳升降速度 $\geq(3\sim 5)\text{mm/a}$,个别 $\geq 2\text{mm/a}$ 的地区多属强震活动区。

新断裂与活断层是据以研究近代差异性断裂活动的主要现象。所谓新断裂,是指在最新构造应力场下形成与发展的断裂。在一个特定的区域内不同性质的新断裂往往构成一定的网络,并能客观地反映出最新构造应力场的特点。活断层是新断裂网络中目前正在活动或有可能活动的特定成分,其类型和特点取决于区域地壳结构和现今三向应力状态,它可以是逆断型或正断型,也可以是走滑型的。

地震是现代断裂活动的伴生物,故其与活断层的关系密不可分。活断层的活动一般有两种主要表现形式,以间歇性的突然错动为其基本特征的,称之为粘滑,这类断层活动通常伴有强震;以持续而缓慢蠕动为其基本特征的,称之为蠕滑,此类断层活动可以仅伴有中小型地震,也可以不伴有地震。除此之外,在大陆内部还有不少断层,虽不具备明显的位移错动,但并不是不活动的,而是断裂的两盘处于经常反复错动着的未愈合状态,一般不伴有地

^① 本文作者:王士天(成都理工大学)

震,丁国瑜等人将其称之为“旷动”。研究表明,蠕滑型活断层仅发育在少数不利于断层闭锁的特定条件下产生,而大部分活断层则属粘滑型。

为了鉴别活断层及阐明其发震特性,所需研究的问题包括:

(1)断层的最新活动时间——这是鉴别活断层及其近期活动危险的标志之一,可通过研究断层与第四纪沉积物和近代地貌的关系以及测定断层带物质的绝对年龄的方法来加以确定。

(2)断层的形态和规模——活断层的形态控制着强震的发生部位,而活断层的规模则是决定其发震能力的重要因素,许多研究者对其之间的定量关系进行了研究,所得统计关系式可作为估计最大震级的参考。

(3)历史平均错动速率(S)和重复活动周期(R_x)——通过研究和测定,如果已知某一被断层所错断的沉积物的绝对年龄为 a_y ,总错距为 l ,同时还知其最大单一错距为 D ,则可根据下列关系式求得上述两个指标,即

$$S = l/a_y; \quad R_x = D/S$$

从关系式中可以看出,活断层的平均错动速率与其重复活动周期呈反比关系,即平均错动速率愈大,发生其所特有的最大地震的频率愈高,所以它是表征断层活动性的重要指标。

(4)沿断裂带地震的活动情况,包括震中分布、震级大小、震源机制及活动迁移特点——除全面收集历史地震及仪器记录地震数据外,还要加强对古地震的研究,这对地震历史记录的时间小于强震重复活动周期的地区尤为重要。

(二)调查方法方面的突破

新断裂和活断层的突出特点是未焊接愈合,有的还有现代活动,所以这类断裂常明显地控制着地形水系的发展和具有显著的特性异常,这就为利用遥感和物探等现代手段查明它们的发育分布提供了条件。近年来的实践表明,配合使用计算机处理的遥感图像和甚低频电磁测量,对查明这类断裂的发育十分有效。

计算机处理的遥感图像,不仅能清晰地显示出控制地形水系的新断裂网络的实际发育情况,而且有助于发现和追溯活断层(包括隐伏性活断层)。所以遥感解释工作在此项调查中可起重要的导向作用。但是必须指出,在计算机处理的遥感图像中,也有一些是假影像,因此就有一个现场验证的问题。在地表无显示的情况下,传统的调查方法由于难于区分究竟是隐伏性断层还是假影像,所以往往不易得出结论。甚低频电磁法可通过测量不同地点极化椭圆倾角的变化,能有效地查明50m~60m厚覆盖层下的隐伏性活断层的发育情况,基本上解决了验证的手段问题。

二、模式、机制研究

现象调查的目的在于了解事物的各个侧面,模式、机制研究有助于正确掌握总体规律,揭示出事物的本质。近些年来的一些研究实践表明,在任何一个地区,上述各种现象及由其所反映的活动带和稳定区的发育绝不会是偶然和杂乱无章的,它们受区域地壳运动方式和特点的制约,通常总是按照一定的模式,结合成特定的总体形变图像,客观地反映出今区