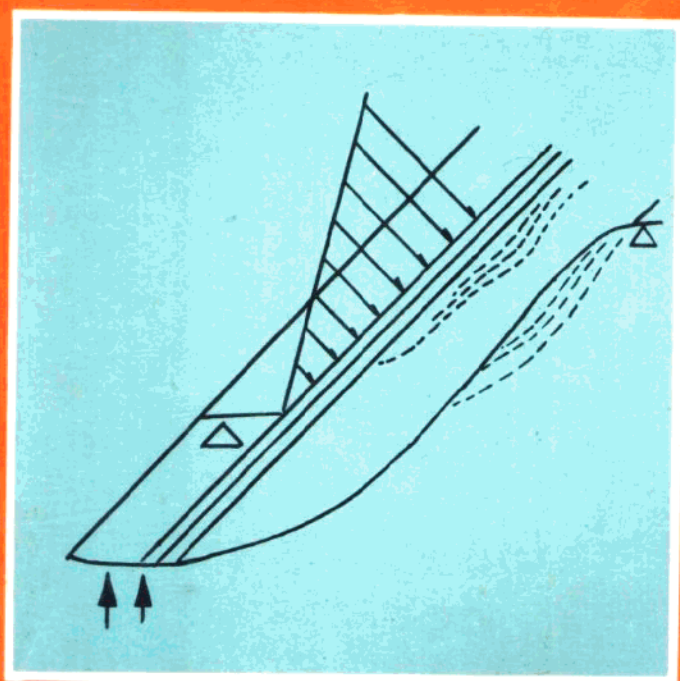


中国科学院工程地质力学
开放研究实验室

长江三峡工程 工程地质力学研究

徐卫亚 许 兵 著
张年学 李兴唐



中国三峡出版社

中国科学院工程地质力学
开放研究室

长江三峡工程 工程地质力学研究

徐卫亚 许兵 著
张年学 李实德

中国三峡出版社

1996

图书在版编目 (CIP) 数据

长江三峡工程工程地质力学研究/徐卫亚等著. - 北京:
中国三峡出版社, 1996.11
ISBN 7-80099-241-1

I. 长… II. 徐… III. 三峡-水利枢纽-工程地质-地质
力学-研究 IV. P642.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 22328 号

长江三峡工程工程地质力学研究
徐卫亚 许兵 张年学 李兴唐 著

中国三峡出版社出版发行
(北京市海淀区蔡公庄 1 号)
葛洲坝集团公司印刷厂印刷
新华书店经销

1996 年 11 月第 1 版 1996 年 11 月第 1 次印刷
开本 787×1092 毫米 1/16 印张: 13.5
字数: 320 千字 印数: 1—2000 册
定价: 20.00 元

目 录

前 言	1
第一章 区域地壳稳定性	4
第一节 区域地质构造特征	4
一 地层和建造	4
二 地质构造及断裂特征	5
第二节 深断裂与地壳结构	7
一 深断裂鉴定标志	7
二 人工地震测深探测成果	9
三 深断裂类型和分布	11
四 地壳结构	15
第三节 区域断裂活动性	15
一 三峡工程邻近地区断裂	16
二 三峡工程外围区断裂活动性	24
第四节 坝址区断裂活动性	28
一 地质条件概述	28
二 断层新活动年龄综合分析	30
三 地震活动	33
四 断裂活动综合评价	34
第五节 区域地震特征及有关的地质、地球物理参数	34
一 历史地震时间、空间分布	34
二 区域和坝区地震基本烈度和参数	37
三 重力(布格)异常	38
四 大地热流	39
五 地壳上升速率	40
六 地壳现代构造应力	41
第六节 区域及坝区地壳稳定性评价	42
一 区域地壳稳定性评价原则与方法	42
二 区域地壳稳定性评价	44
三 三斗坪坝址地壳稳定性评价	50
四 结论	51
第二章 三峡水库顺层岸坡的变形破坏机制与稳定性评价	52
第一节 顺层岸坡地质环境与类型划分	52

一	复兴场至奉节段顺层岸坡地层岩性与构造概述	52
二	顺层岸坡工程地质岩组划分	53
三	顺层岸坡地貌特征	55
四	顺层岸坡结构类型划分	55
第二节	顺层岸坡变形破坏主要动力与稳定性影响因素	57
一	云 - 奉地段降雨特点及降雨对滑坡产生与复活的概率分析	57
二	岸坡演变古环境气候分析	69
三	河流动力作用分析	70
四	地下水对岸坡稳定性的影响	76
五	人类活动对岸坡变形的影响	78
六	弱膨胀岩对岸坡稳定性的影响	78
第三节	变形破坏模式分析	78
一	重力破坏划分的基本破坏模式	78
二	动力破坏类型划分及其基本演变模式	81
第四节	自然坡危险与破坏概率法岸坡稳定性分析	84
一	原理与方法	84
二	各类岸坡分析结果与稳定性评价	87
第三章	三斗坪坝址缓倾角结构面成因地质力学模拟试验及数值分析	94
第一节	区域构造应力场分析	94
第二节	坝址区陡倾角断层构造形迹及应力分析	96
一	陡倾角断层构造形迹宏观调查	96
二	坝址陡倾角断层显微构造形迹分析	96
第三节	缓倾角结构面发育规律	99
第四节	模拟设计	101
第五节	构造作用的往复迭加	102
第六节	模拟试验成果	103
第七节	数值模拟分析	105
第八节	几点补遗	107
第四章	三峡坝基工程岩体结构研究	109
第一节	三峡坝址工程地质岩组研究	109
一	工程地质岩组	109
二	坝址工程地质岩组划分	109
三	不同工程地质岩组的物理性质	110
四	工程岩体风化问题	110
第二节	坝基岩体地质构造规律	114
一	断裂构造	114
二	裂隙	115
第三节	三峡工程坝区岩体赋存环境研究	117
一	坝区地应力特征	118

二	坝基岩体水力学基本特征	120
三	讨论	121
第四节	坝基岩体结构地质类型研究	122
一	结构面特性及分级	122
二	结构体特征	124
三	岩体结构地质类型划分	124
四	岩体结构参数	125
第五节	坝基岩体结构力学介质研究	128
一	坝基岩体结构力学介质类型	128
二	典型类型结构稳定分析	132
第六节	岩体结构随机模型模拟	141
一	结构面空间分布基本特征	141
二	结构面空间分布 Monte - Carlo 模拟	143
三	三峡坝基岩体结构面随机模型模拟	143
四	模拟结果	145
第五章	三峡坝基岩体质量评价及优化建基面选取研究	148
第一节	岩体质量评价研究历史回顾	149
一	国外研究状况	150
二	国内研究状况	154
第二节	岩体质量评价研究准则	159
一	工程地质力学指导研究的准则	159
二	工程地质、地质工程、岩体力学三位一体研究	159
三	客观性	159
四	系统性	160
五	可协调性	160
六	通用性及实际可接受性	160
七	评价方法的动态性	160
八	评价结果的稳定性	160
第三节	岩体质量评价层次分析重排序次法	160
一	评价指标体系的确定	160
二	层次分析确定各因素权重	162
三	重排序次确定岩体质量优劣	166
四	坝基评判结果分析	169
第四节	岩体质量评价马氏距离最优点排序法	181
一	马氏距离	181
二	马氏距离判别	181
三	马氏距离最优点排序	182
四	坝基岩体质量评价结果	183
第五节	坝基建基面选取的优化决策	186

一	目标函数及约束条件·····	186
二	数学推演·····	187
三	岩体力学性质参数选取·····	188
四	优化决策分析结果·····	192
第六节	结语·····	193

前 言

长江三峡水利枢纽是开发和治理长江的关键性骨干工程。三峡工程是中国、也是世界上最大的水利枢纽工程,具有防洪、发电、航运等多种综合效益。建设三峡工程功在当代,利及千秋。

防洪是三峡工程建设的首要任务。因其地理位置优越,可有效地控制长江上游洪水,是长江中下游防洪体系中不可替代的组成部分。三峡水库有防洪库容 221.5 亿 m^3 ,直接保护的人口为 1500 万人,耕地为 153 万公顷,可使荆江河段的防洪标准从现状不足 10 年一遇提高到百年一遇;遇千年一遇或更大洪水,配合荆江分洪等分蓄洪工程的运用,可防止荆江两岸发生干堤溃决的毁灭性灾害;可减轻中下游地区洪水淹没损失和对武汉市的洪水威胁,并为洞庭湖区的根治创造条件。

三峡水电站装机总容量 1820 万 kW,年平均发电量 846.8 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,主要供电华东、华中地区,小部分送川东。每年约可替代原煤 4000 ~ 5000 万吨。将为经济比较发达但能源供应不足的华中、华东地区提供可靠、廉价、清洁和可再生的能源,对经济发展和减少环境污染起到重大作用。

三峡水库将显著改善长江自宜昌至重庆 660km 的航道,万吨级船队可直达重庆港,航道单向年通过能力可由目前的约 1000 万吨提高到 5000 万吨,运输成本可降低 35 ~ 37%。因三峡水库的调节,宜昌下游枯水季最小流量可从现状的 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 提高至 $5000\text{m}^3/\text{s}$ 以上,将显著改善长江中下游枯季航运条件。

枢纽主要建筑物由大坝、水电站、通航建筑物等三大部分组成。

泄洪坝段位于河床中部,即原主河槽部位,两侧为电站坝段和非溢流坝段。水电站厂房位于两侧电站坝段坝后,另在右岸留有后期扩机的地下厂房位置。永久通航建筑物位于左岸。

拦河大坝为混凝土重力坝,大坝轴线全长 2309.47m,坝顶高程 185m,最大坝高 175m,枢纽最大泄洪能力为 $11.6\text{万 m}^3/\text{s}$,可渲泄可能最大洪水。水电站采用坝后式,分设左、右岸两组厂房。左岸厂房安装 14 台水轮发电机组;右岸厂房安装 12 台水轮发电机组。机组单机容量 70 万 kW,共 26 台。

永久通航建筑物包括永久船闸和升船机。

永久船闸为双线五级连续梯级船闸,单级闸室有效尺寸为 $280 \times 34 \times 5\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 坎上水深),可通过万吨级船队。年单向通过能力为 5000 万吨。

升船机为单线一级垂直提升式,承船厢有效尺寸为 $120 \times 18 \times 3.5\text{m}$,一次可通过一条 3000 吨级客货轮。

施工期另设单线一级临时通航船闸,闸室有效尺寸为 $240 \times 23 \times 4\text{m}$ 。

三峡工程主体建筑物及导流工程需完成的主要工程量为:土石方开挖 10283m^3 ,土石方填筑 3198m^3 ,混凝土浇筑 2794 万 m^3 ,金属结构安装 25.65 万吨,水轮发电机组安装 26 台套,共 1820 万 kW。

工程采用分期导流方式,分三期进行施工。

第一期导流,利用中堡岛修建一期土石方围堰围护右岸叉河,一期基坑内修建导流渠和碾压混凝土纵向围堰。同时在左岸岸坡修建临时船闸。本期江水及船舶仍从主河床通过。

第二期导流修建二期上、下游横向围堰,与混凝土纵向围堰形成二期基坑,进行河床泄洪坝段、左岸电站坝段、左岸电站厂房施工。同时在左岸修建永久通航建筑物。二期导流时,江水经导流明渠下泄,船舶经明渠、临时船闸通行。

第三期导流,修建三期碾压混凝土围堰拦断明渠并蓄水至 135m 高程,左岸电站及永久船闸可开始投入运行。三期围堰与混凝土纵向围堰形成三期基坑,修建右岸大坝和电站。三期导流期间,江水经由永久深孔和设于泄洪坝段的 22 个临时导流底孔下泄。

工程施工的控制性进度安排为:准备工程及一期工程施工共 5 年;二期工程施工需 6 年;三期工程施工共 6 年。工程施工总工期 17 年。1993 年开始施工准备,1997 年大江截流,2003 年(第 11 年)第一批两台机组可以开始发电。

三峡工程规模宏大,意义深远。建设长江三峡工程面临着许多复杂的工程技术难题,其中工程建设的工程地质力学研究是诸多具有挑战性的问题之一。

三峡地区系统地质调查工作可追溯至本世纪二十年代,我国一些著名的地质学家,曾先后在这一地区做过许多有价值的基础地质研究。三峡工程较早的专门性工程地质勘察工作始于四十年代中期,原中央地质调查所配合全国水力发电总处为扬子江三峡工程计划进行了地质调查,中方和美国垦务局亦合作进行了少量的钻探工作。解放后,三峡工程提到了国家建设的重要日程上,随着工程规划设计工作的开展,逐步开始了全面系统的工程地质勘察和研究工作。1954~1956 年,进行了宜昌——奉节河段查勘,在有关预选坝址河段进行了钻探,初步了解了结晶岩体的完整性及风化情况。1956~1985 年,随着长江流域规划和三峡工程规划设计工作的全面展开,有计划、大规模地开始了地质勘察工作,这段时期不仅取得了大量的基本资料和成果,而且对有关的重大地质问题,有了基本一致的认识和比较明确的结论。60 年代中期至 70 年代末,根据设计工作的需要,又对结晶岩河段中河谷较窄的坝址进行了深入的勘察研究。在 1979 年国家组织的三峡工程选坝会议上,选定了三斗坪坝址,围绕设计优化和方案比较,进行了大量的勘察、试验和专题研究。

1985 年以后,国家为了对三峡工程建设及某些重大技术问题做出慎重决策,组织了不同层次的技术经济论证,1986 年至 1990 年期间,在国家“七·五”重点科技攻关项目《长江三峡工程重大科学技术问题研究》(75-16)中,设立了“长江三峡工程地质与地震问题研究”课题(75-16-02),着重对坝区及外围地壳稳定性、坝基和高边坡岩体工程问题,水库诱发地震,库岸稳定性和水库环境地质评价与预测等问题进行研究。在此期间,还紧密结合工程设计和施工的需要,开展了三峡工程前期科研的工作,围绕“坝址工程地质及岩石力学问题”,先后设立了若干子题进行研究。取得了丰富的成果,对一些重大问题在认识上有了很大的提高或突破。本著述就是在这一时期围绕着国家科技攻关及三峡工程前期科研而开展研究所取得的一些成果。

著作中涉及长江三峡区域及坝区地壳稳定性、三峡工程库岸稳定性、三峡工程坝区缓倾角结构面成生发育规律、三峡工程坝基工程岩体结构、质量评价、优化建基面选取等具有广泛代表意义的工程地质力学研究课题。

三峡工程规模巨大,地壳现代活动对工程安全的影响程度的研究十分必要,课题的研究

中调查了三峡及邻区断裂,采集了断层新活动年龄样品,搜集了地震和深部构造探测资料,研究了以长江三峡工程坝址(三斗坪)为主的约250km的库区和坝址的地壳稳定性。三峡水库将成为狭长河谷型水库,按设计库水位175m计算,干流库岸长达590km。顺层岸坡是一类稳定性最差,潜在破坏性最大的岸坡。三峡库岸顺层岸坡以云阳至复兴场,故陵至奉节罗家沱一段最为典型。研究中选择了云阳奉节段为研究重点,对其进行了从地质环境与类型,变形破坏动力与影响因素,破坏演变模式,岩体力学特性,物理模拟与数值模拟,失稳机制分析,稳定性预测评价等系统研究。三斗坪坝址区发育的缓倾角结构面对坝基稳定等将产生一定的影响,为了能较好地地从力学机制、力学行为上分析论证坝址缓倾角结构面的成因模式,研究分别进行了缓倾角结构面成因地质力学模拟试验及数值分析。工程地质力学的核心是“岩体结构控制岩体稳定性”,对三峡坝基岩体结构的研究是三峡工程坝基岩体工程研究的重大基础性问题,课题研究了三斗坪坝基工程岩体结构地质类型划分、岩体力学介质、岩体结构随机模型模拟等诸多问题,并进行了有关典型问题的力学分析。优化建基面的选取是坝基岩体工程研究的一个具有重大经济效益的课题,研究了坝基工程岩体质量评价体系,分别提出了若干新的评价方法,并进行了三峡工程坝基建基面选取的优化决策分析。

本著作的有关成果在九十年代初曾先后接受了有关部门的评审鉴定,成果被认为是“总体具国际先进水平、部分达国际领先”。“长江三峡工程工程地质力学研究”同时也是中国科学院工程地质力学开放研究实验室学术基金所资助的重大研究课题之一,本著作的出版得到了中国科学院工程地质力学开放研究实验室的资助。在本项目的研究中长江水利委员会三峡勘测研究院等许多单位及专家给予了友好的合作和帮助,徐继先博士、赵占朝博士、保长汉博士、张文斌博士、蔡德所博士等参加了部分研究工作,著作中还引用了部分单位及学者的有关资料,一并致谢。

应当指出的是,本著作中的部分内容曾由作者发表过,进行了广泛的学术交流,为了保持“长江三峡工程工程地质力学研究”课题研究的系统性、完整性,作者们还是决定进一步将这些内容充实,完整地发表出来。

本著作前言及第三章、第四章、第五章由徐卫亚教授及许兵研究员著述,第一章由李兴唐研究员、许兵研究员著述,第二章由张年学研究员著述。全书最后由徐卫亚、许兵总定稿。在著作的撰写过程中,李兴唐研究员不幸因心脏病突发而病故,在本著作正式出版付印之际,对李兴唐研究员表示深切的怀念。

作者们相信,本著作的出版对繁荣工程地质力学科学的研究,对促进长江三峡水利枢纽工程的建设会有所裨益。

第一章 区域地壳稳定性

区域地壳稳定性是指岩石圈内正在进行的地质、地球物理作用对地壳表层及工程建筑安全的影响程度,即由地球内力作用下的地面变形、断裂位错和地震等地质灾害对人类和工程建筑安全的影响程度。简言之,即地壳现代活动对工程安全的影响程度。三峡工程规模巨大,评价其地壳稳定性实属必要。为此,调查了三峡及邻区断裂,采集了断层新活动年龄样品,搜集了地震和深部构造探测资料;研究了以长江三峡工程坝址(三斗坪)为主的、约250Km的库区和坝址的地壳稳定性。

第一节 区域地质构造特征

一、地层和建造

研究区域跨越两个大地构造单元。以城口襄樊——广济深断裂为界,其北为秦岭褶皱系,南为扬子准地台。两大构造单元的地层、建造存在着巨大的差异,其地理分布,见图1-1。工程区(水库、坝址)位于地台上。

(一)扬子准地台区

它占据研究区大部分面积,地层由元古界基底和震旦——第三系盖层组成。盖层缺失志留系上统、泥盆系下统及石炭系上统。第四系仅分布于大江河谷和江汉平原区,厚度不大。基底为中、上元古界变质岩(崆岭群、神农架群和马槽园群和板溪群等)和晚元古代花岗岩(黄陵花岗岩)共同组成。

元古界变质岩和花岗岩之上,不整合沉积震旦系下统和上统。震旦系之上假整合沉积下寒武统碳酸岩。中寒武统至三叠系中统以浅海相灰岩、白云岩、白云质灰岩为主夹少量砂页岩,志留系中、下统和泥盆系中、上统为浅海相碎屑岩和泥质岩。三叠系—侏罗系为陆相碎屑岩夹煤层。白垩系不整合于侏罗系之上为断陷盆地沉积,它们仅分布于江汉盆地、远安、恩施等地。第三系仅分布于江汉盆地、常德断陷区,它们是陆相红色岩和泥灰岩沉积。在江汉盆地第三系中含有玄武岩。第四系主要分布于大江河谷和平原区。

扬子准地台区,古生代以来的火成岩不发育,仅在岳阳地区有燕山期花岗岩。

(二)秦岭褶皱系(带)

在区内有南秦岭、大巴山、武当山、大洪山区,其构造单元见图1-1。武当山区、大洪山区出露中元古界变质岩系,它们是本构造单元的最古老岩系。

震旦——二叠系沉积为冒地槽型沉积。震旦下统中基性火山岩系,上震旦——中奥陶统碳酸盐台地沉积(夹地台沉积)。上奥陶——下泥盆以碎屑岩为主。中泥盆——上二叠统沉积以碳酸盐为主。本区缺失三叠——侏罗系。作为褶皱带(系)上古生代变质岩的盖层是白垩系和第三系陆相红层,它们仅分布在小型盆地内。

秦岭褶皱系火成岩比较发育,除中元古界火山岩外,有晚元古界火山岩,加里东期超基性岩和基性岩,还有燕山期花岗岩。

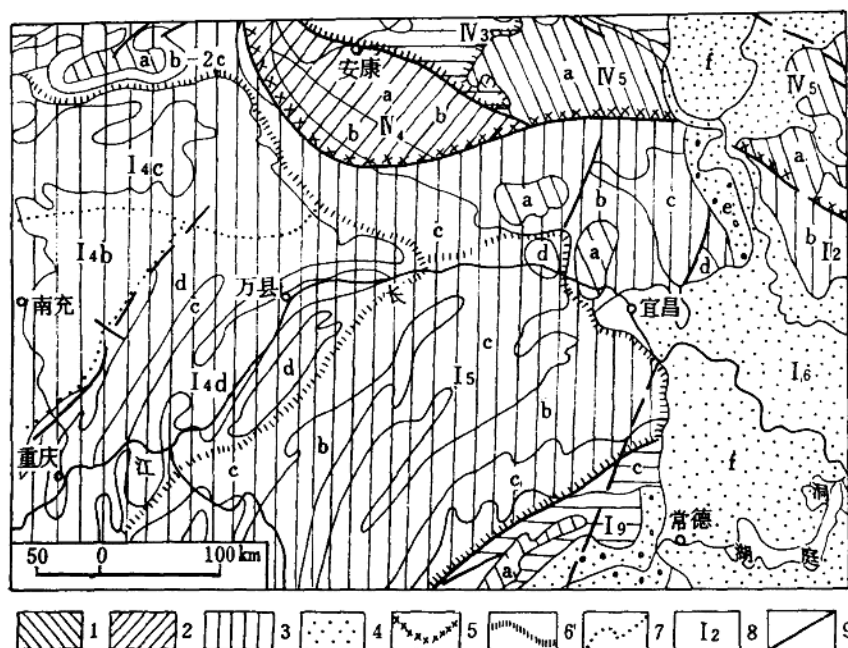


图 1-1 大地构造单元(据黄汲清等观点, 1986)

1. 晋宁期褶皱; 2. 加里东期褶皱; 3. 燕山-喜山期褶皱; 4. 新生代拗(断)陷; 5. 一级构造单元分界; 6. 二级构造单元分界; 7. 三级构造单元分界; 8. 构造单元编号; 9. 深断裂; IV 秦岭褶皱系; IV₄ 南秦岭褶皱系; IV₅ 武当-淮阳隆起; I 扬子准地台; I₂ 龙门大巴山台缘褶皱带; I₄ 四川台地; I₅ 上扬子台褶皱带; I₆ 江汉断拗; I₉ 江南台隆; a. 元古界(包括侵入岩); b. 震旦-志留系; c. 泥盆-三叠系; d. 侏罗系; e. 白垩下第三系; f. 上第三-第四系

(三) 建造类型和构造层划分

扬子准地台区, 晋宁期褶皱, 成为地台, 晚元古界变质岩、火成岩组成基底。震旦系——晚侏罗世地层多为整合, 极少数为假整合或沉积间断。所以, 震旦下统——侏罗上统划为下构造层。燕山早期运动使侏罗系及以前地层褶皱, 断裂。白垩系岩层受燕山晚期构造运动作用, 断裂和轻微褶皱。第三系陆相红层不整合于其上。故白垩系可划为中构造层; 新生代地层为上构造层。构造层、地层及构造运动, 见表 1-1。

秦岭褶皱带(地槽系)历经晋宁期、加里东期、海西期和燕山期、喜山期构造运动。海西运动地槽褶皱、回返。所以, 区内秦岭褶皱系区可划分为: (1) 中、下元古界; (2) 晚元古界; (3) 下古生界; (4) 上古生界; (5) 中生界(白垩系)和(6) 新生界(第三系)六个构造层, 其特性, 见表 1-2。

二、地质构造及断裂特征

扬子(准)地台区震旦——侏罗纪构造运动是以升降为主。下侏罗世末期燕山运动(早), 沉积盖层褶皱、断裂, 奠定了区域构造型式和断裂格架。褶皱型式为宽缓的短轴背向斜, 在各地区它们的轴向不完全相同。大巴山区为近 EW 向南凸出的弧型, 长江三峡区轴向

近 EW, 川东、鄂西轴向 NE。形成上述褶皱轴向的力学原因是, 在燕山早期运动中, 区域受近 SN 向压应力作用下, 由于受神农架、黄陵地块的阻挡(支撑), NE、NW 走向深断裂的滑动, 从而形成如上的构造格局, 见图 1-2 和 1-4。

表 1-1 三峡地区(扬子准地台)构造层、地层、建造

特征构造层	地层及代号	岩性、建造类型	地层接触关系	构造运动分期
上构造层	第四系、上第三系 下第三系 Q-E	第四系砂、砂砾石层、土层, 冲积残坡积上第三系红色砂岩、页岩夹砾岩陆相红色碎屑岩建造, 下第三系红色砂岩、砾岩夹玄武岩、陆相红色碎屑岩建造	~不整合~	喜山早期 燕山晚期
中构造层	白垩系-中上侏罗系 (K-J _{2,3})	红色砂岩、页岩、砾岩、陆相红色碎屑岩建造	~不整合~	燕山晚期
下构造层	下侏罗统-上三叠统 (J ₁ -T ₃)	黑色、灰色页岩、砂岩、页岩夹煤层陆相及海陆交替含煤碎屑岩建造	沉积间断	平行 ~不整合~ 晋宁运动
	中三叠统-中泥盆统 (T ₂ -D ₂)	石灰岩、白云岩为主, 砂页岩含煤(C-P 部分) 浅海碳酸岩和浅海碎屑岩(含煤)	沉积间断	
	志留-震旦系 (S-Z)	石灰岩、白云岩、白云质灰岩、页岩、冰碛砂岩 浅海碳酸岩、碎屑岩建造、陆相磨拉石(Z ₁)	平行 ~不整合~	
基底构造层	上元古界 P ₃ , T ₂	变砂岩、火山碎屑岩、千枚岩、片岩、大理岩、花岗闪长岩、花岗岩、复理石建造、火山岩建造		

断裂特点是, 大巴山、神农架区发育走向 NW-NE 压性断层, 川东、鄂西区以 NE 向逆断层位优势。宜昌——五峰区发育走向 NNW 的右旋扭性断层(图 1-2 和 1-4)。白垩纪末的燕山运动构造形变以断裂为主。它使燕山早期形成的断层产生叠加作用。黄陵断块以东地区形成走向 NNW、NNE 断裂和断陷盆地。前者如远安断裂、钟祥断裂, 后者以常德断裂、南阳断裂为代表。

秦岭褶皱带, 加里东运动、华力西运动和燕山运动, 褶皱、逆断层走向以 NW 为主。

第三纪期间(喜山运动早期)形成南阳、江汉断陷盆地和断层。第四纪早期断层有新活动, 秦岭褶皱带断层走向以 N60°~80°W 最发育(图 1-3), 它们形成于晋宁、加里东和海西期。

三峡水库及坝址外围区较大的断裂有黔江断裂、仙女山断裂、天阳坪断裂和远安断裂

等,见图 1-4。

表 1-2 南秦岭褶皱带地层建造及构造层简表

地 层	主要岩性(接触关系)	岩相、建造	构造层及构造期
第四系	松散土砂、卵石层、姜石粘土	残坡积、冲积相	
第三系	不整合 红色砂岩、砾岩、 粘土岩夹泥质灰岩	河湖相	——喜山运动——
白垩系	不整合 红色砂、砾岩、 粘土岩夹泥质灰岩	湖泊相	——燕山运动—— 中生界构造层
石炭系	不整合 石灰岩、泥质灰岩	浅海台地(冒地槽型建造)	——海西运动——
泥盆系	平行不整合 砂岩、页岩、粘土岩	浅海-滨海(冒地槽型)碎屑岩,复理石建造	上古生界构造层
志留系	平行不整合 泥岩、变砂岩、板岩、千枚岩、 变拉斑玄武岩、变凝灰岩	浅海冒地槽型裂隙喷发火山岩建造,复理石建造	——加里东运动——
奥陶系	粘土岩,细砂岩夹白云岩, 白云岩、石灰岩	滨海-浅海(冒地台型,碳酸盐建造为主,复理石为次)	下古生界构造层
寒武系	石灰岩、结晶灰岩夹片岩	滨海-浅海地台碳酸盐复理石	
震旦系	假整合或平行不整合 中、上部片岩、大理岩及石灰岩、白云岩(Z_0) 下部变砂岩、变凝灰岩、片岩	浅海-滨海地台碳酸盐,火山岩	晚元古构造层
中元古界(武当群)	不整合 片岩、变粒岩夹大理岩,变火山岩、变凝灰岩	次深海-深海伏地槽碳酸盐、浊积岩、火山岩、复理石	——晋宁运动—— 中元古界构造层
下元古界(雁岭沟组)	不整合? 大理岩夹片岩和片麻岩	深海复理石碳酸盐	下元古界构造层

三峡工程坝址位于川东鄂西构造变动较轻的黄陵背斜的核部并靠近缓倾斜岩层,断裂规模很小。坝址区晚元古代花岗岩区仅有小型断层,大多数长 1~3Km,最长者 16Km。所以,从地质构造条件分析,坝址是良好的。

第二节 深断裂与地壳结构

一、深断裂鉴定标志

地壳演化和现代活动都受深断裂控制。按断裂切割深度,它可分为四大类:(1)盖层断裂;(2)基底断裂;(3)地壳断裂和(4)岩石圈断裂(张文佑分类),后三者称深断裂。深断裂将

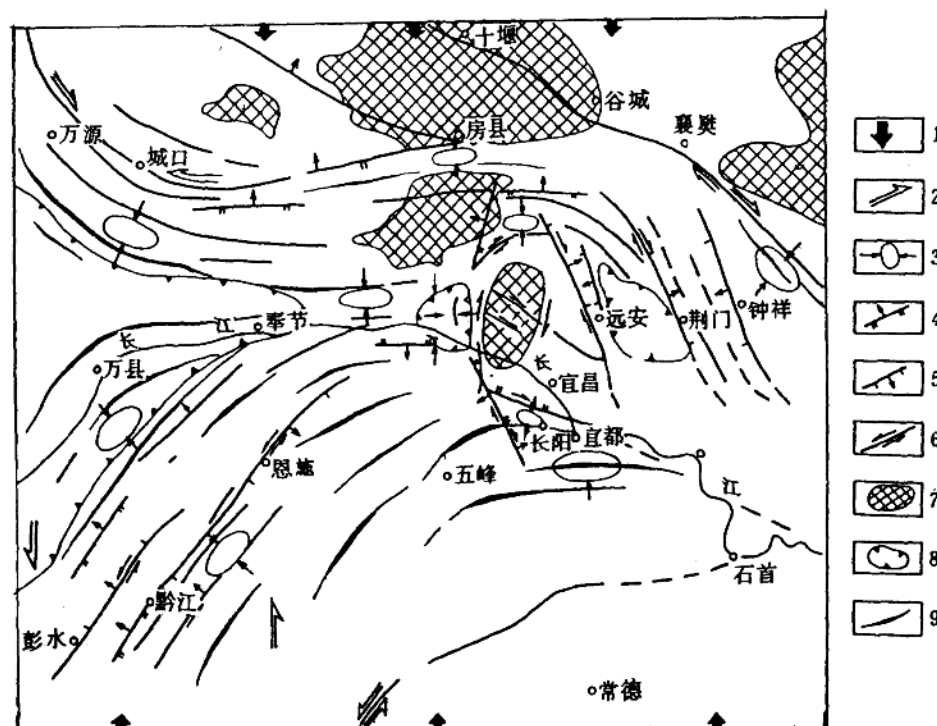


图 1-2 三峡及邻区燕山早期(下侏罗世末)断裂及构造应力分析图

1. 区域主压应力; 2. 局部剪应力; 3. 局部压应力及应变椭圆; 4. 逆断层; 5. 正断层; 6. 平错断层及位错方向; 7. 隆起断块(穹隆); 8. (上二叠-下侏罗盆地); 9. 主褶皱(背斜)

地壳或岩石圈切割成各种形状、厚度的断块和地壳结构。在地壳稳定性评价中,深断裂和地壳结构是很重要的指标。断裂发割深度的判定可以采用地质学和地球物理探测方法。因为,断裂形成时,具有一定的空隙,随之岩浆侵入或喷发至地面形成火成岩。火成岩平面分布与断裂方向一致。根据火成岩类型和岩石化学特征,即可判定岩浆源深度,由此可鉴定断裂切割最大深度。火成岩形成时代即代表断裂形成时代。地震的能量级大小也与断裂深度密切相关。所以,历史地震活动也是鉴定断裂深度类型的重要方法。

深断裂的鉴定标志或方法就是地震地质综合分析。地史时期断裂深度类型见表 1-3。

人工地震测深和大地电池测深是判定断裂深度类型可信度很高的方法,如已进行过探测的应尽量利用。

经分析,一般情况下,中国东部地区的基底断裂可以引起 $4 < M < 6$ 地震,其中大多数为 $M = 5 - 5\frac{1}{2}$ 地震。在中国西部,基底断裂不产生 $M \geq 5$ 地震。作者分析了我国主要强震带 ($M \geq 6$) 认为,它们是由地壳和岩石圈两类断裂引起的。

表 1-3 断裂深度类型与震级关系

类 型	切 割 深 度		地质现象	重磁异常 界面变化	最高地震 级(M)和 近代位错
	地质分析	地球物理探测* (Km)			
盖层断裂	沉积盖层及火成岩体的一定深底或达基底顶面	上地壳或达基底顶面 5-12	地面出露区域性大断裂或有火成岩墙(脉)	一般情况下缺乏	$M \leq 3$ 微震可能位错
基底断裂	基底和“花岗岩层”或达康拉德面	中地壳和部分下地壳上部或达康拉德面 18-57	沿断理解带有中酸性火成岩或隐伏于断陷盆地之下	磁异常样级带居里面突变带	$M_s < 6$ 地震发震构造
地壳断裂	“玄武岩层”内或达上地幔顶面(莫霍面)	下地壳或达上地幔顶面(莫霍面) 30-75	沿断裂带有基性火成岩(玄武岩、辉绿岩、辉长岩)和碱性岩大陆裂谷	局部重力梯级带莫霍面突变(断裂)带	$M \geq 6$ 地震发震构造形成地震带、蠕动运动或产生地震断层
岩石圈断裂	岩石圈上部或达软流圈一定深度	上地幔之下一定深度或达软流圈 50-200 或更深	沿断裂带分布超基性岩或地幔源岩类(金伯利岩、榴辉岩), 高压变质岩板块边界, 大陆裂谷	区域重力异常梯级带莫霍面突变(断裂)带 重力均衡异常带	

* 据中国大陆和领海地球物理探测和分层综合的最大深度, 小值代表东部区, 大值代表西部区。

二、人工地震测深探测成果^①

人工地壳测深成果表明, 三峡及清江流域(扬子准地台)地壳可分上、中、下三大地球物理-地质层(地壳), 见图 1-3(1)。

上地壳底面埋深 12.0~16.8Km, 它包含沉积盖层和结晶基底变质岩层和火成岩。盖层底面埋深 0~8.2Km, 即盖层厚度。结晶基底顶面起伏较大。黄陵附近(包括三峡工程三斗坪坝址)出露地面, 它以东以 10° 倾角向东倾斜江陵, 顶面埋深 8Km。黄陵背斜以西秭归, 基底顶面埋深 7Km, 奉节 6.6Km。

由地壳底面埋深 24.0~28.8Km, 东浅西深, 其厚度 11~16Km。中地壳包括闪长质岩或花岗质岩。中地壳起伏差小, 平均仅 4~5Km。

下地壳底面(M 面)埋深 33.8~46.8Km。它包括辉长质岩和壳幔过渡层。黄陵背斜起以西下地壳厚 15.2~19.0Km, M 面埋深 41.2~46.8Km。在新滩附近 M 面垂直落差达 5Km, 但向上没穿过闪长岩层, 即存在隐伏的地壳或岩石圈断裂(图 1-3(1))。黄陵背斜以东下

① 长江水利委员会勘测总队等, 1990, 长江三峡工程坝区及外围地壳稳定性研究

地壳厚 8.8~11.5Km, M 面埋深 33.8~37Km。

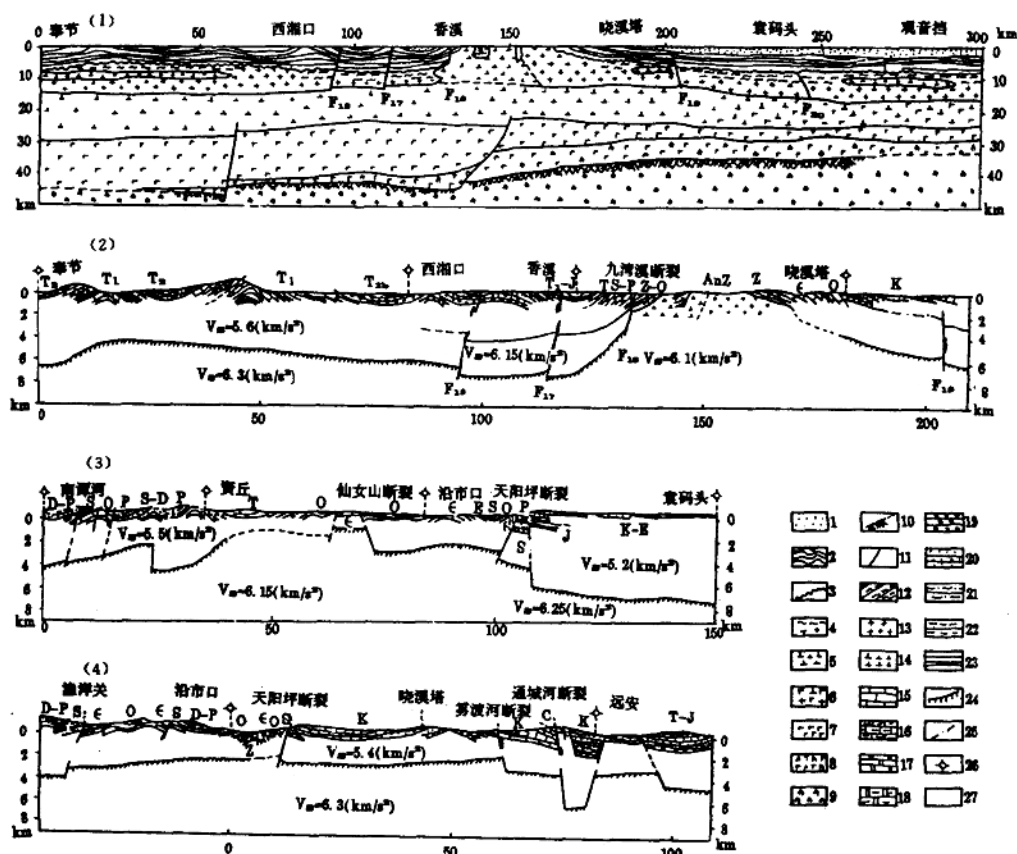


图 1-3 人工地震测深综合解释剖面

(据长江水利委员会勘测总队等, 1990)

(1) 奉节—观音桥(工测线)地球物理—地质综合解释剖面; (2) 奉节—宜昌基底构造剖面; (3) 黄丘—表码头基底构造剖面; (4) 渔洋关—远安基底构造剖面

1. 陆相沉积岩层; 2. 海相沉积岩层; 3. 不整合; 4. 基底变质岩—花岗岩层; 5. 闪长岩层; 6. 辉长、闪长岩层; 7. 辉长岩层; 8. 壳幔过渡层; 9. 铁镁质橄榄岩层; 10. M 界面及推测 M 面; 11. 断裂编号; 12. 片岩、片麻岩; 13. 花岗岩; 14. 闪长岩; 15. 灰岩; 16. 泥质灰岩; 17. 白云岩及白云质岩石; 18. 泥质白云岩; 19. 砾岩; 20. 砂岩; 21. 泥质砂岩; 22. 泥岩; 23. 页岩; 24. 基底顶面; 25. K 与更老岩层不整合; 26. 地震测深观测点位置; 27. 波速(Km/s)

人工地震测深成果分析提出, 在新滩——乐天溪之间存在断距 5Km 的断裂。碓石附近 M 面落差 3Km (图 1-3(1)), 也存在隐伏断裂。这表明, 上两地地壳深部存在地壳断裂或岩石圈断裂。但是, 其上界仅影响到中地壳(闪长岩质层), 所以, 它们是元古代形成的, 其后没活动过。探测结果表明, 大多数断裂仅影响到基底顶面, 见图 1-3(2)、(3)、(4), 少数断裂影响到中地壳或上地壳底面(图 1-4)。这些探测成果是分析深断裂特性的重要证据。