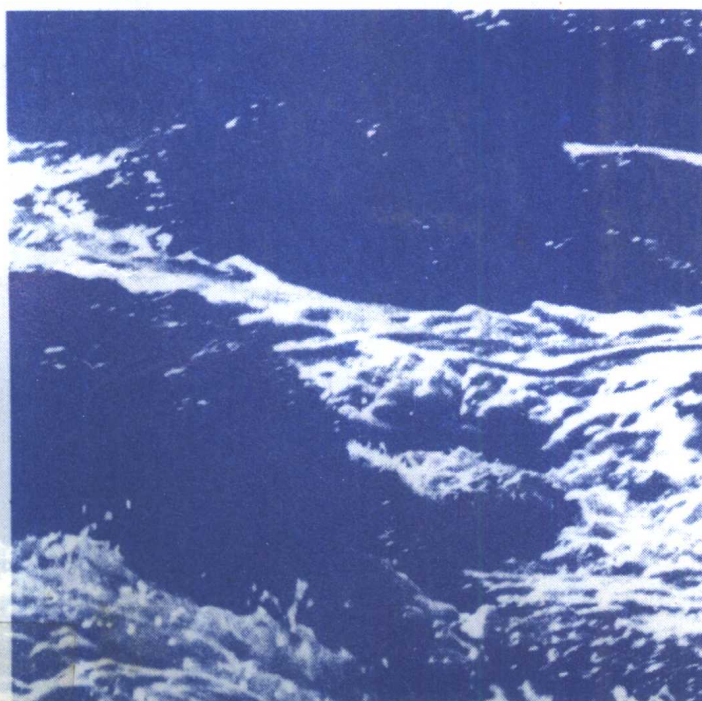


长江三峡坝区 地壳应力与孔隙水压力 综合研究

苏恺之 李方全 张伯崇 王建军 等



地震出版社

长江三峡坝区地壳应力与 孔隙水压力综合研究

苏恺之 李方全 张伯崇 王建军 等

地 震 出 版 社

1 9 9 6

内 容 提 要

本书为长江三峡坝区地壳应力与孔隙水压力综合研究论文集,内容包括:三峡坝区及邻区现今构造应力场;三峡茅坪 800m 钻孔水压致裂应力测量中的孔隙水压力的研究成果及模拟实验;岩石中包括致密岩体和极低渗透岩层的孔隙压力测量方法、原理及裂隙岩体多重网络渗流模型;水库诱发地震等。

本书可供三峡工程、水利、水电设计科研人员、高等院校有关专业师生以及关心三峡工程的人士阅读参考。

长江三峡坝区地壳应力与 孔隙水压力综合研究

苏恺之 李方全 张伯崇 王建军 等

责任编辑:张晓梅 吴 兵

*

地 震 出 版 社 出 版

北京民族学院南路 9 号

中国地质大学轻印厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经销

*

787×1092 1/16 13 印张 333 千字

1996 年 8 月第一版 1996 年 8 月第一次印刷

印数: 001—600

ISBN 7-5028-1366-7/P·855

(1794) 定价: 20.00 元

前 言

“长江三峡坝区地应力场的综合研究”是国家“八五”重点科研项目“长江三峡地壳稳定性和水库诱发地震问题的深化研究”的子课题。

为进一步了解坝区及其邻近地带的地壳应力状态，我们在以往的地质调查、地应力场演化研究的基础上，进一步就现今的构造应力场问题进行资料收集与整理工作，发现了应力场分布的复杂性及分区性特征，即坝区以西及坝区以东的主应力方向的差异性，并根据现有资料认为，这一地区是中、低应力水平的地区，对地壳稳定性较为有利。

在坝区进行地应力实测的深钻孔较少，茅坪 800m 钻孔是唯一超过 500m 的钻孔，其应力实测资料十分珍贵。国家地震局地壳应力研究所在“七五”期间曾为该孔实测工作的顺利完成尽了最大的努力。由于该钻孔为致密花岗岩体，曾引发过一些十分有益的讨论。随着“八五”科研项目的完成，这些讨论已经有了较为明确的答案，本书的主要内容都是和这些讨论有关的结论。

讨论的第一个核心问题是水压致裂法地应力测量工作中，对计算最大水平主应力公式中孔隙水压力项 P_0 的理解和处理。茅坪孔为致密花岗岩体，孔隙率低至 1%，在水文地质和水文工程中都被视为隔水层和不含水体，对此是否还要考虑孔隙水、孔隙水压力？在如此致密的岩体中有效应力定律是否成立？水压致裂应力测量的计算式中是否还要有孔隙压力项？本书对此进行了较为细致的调研。分析表明：在花岗岩体的水压致裂应力测量中，必须考虑孔隙水压力项。

讨论的另一个焦点问题是孔隙水压力的测定技术。在“七五”期间，曾用双封隔器方法对花岗岩中有裂隙的层位进行了孔隙水压力的测定，这在国内尚属首次。此后又有人提议，应在花岗岩的致密段进行孔隙压力的实测。限于致密岩体的渗透率极低，目前尚无成熟的方案和仪器，我们只能从过去的实践经验出发，给出了新的测量方案和设计。

在考虑致密岩石的破裂规律时，有效应力定律依然成立。在考虑水库诱发地震的问题时，更要重视孔隙水压力，尤其是水沿裂隙和断裂的渗透作用 and 水的压力。在这方面，周维垣教授给了我们极大的支持，并为本书撰写了“裂隙岩体多重网络渗流模型研究”一文。

运用三峡坝区地应力实测资料，可以帮助人们从断层稳定性的力学分析角度来研究水库诱发地震问题。本书考虑了以下几种情况下的断层稳定性：水库蓄水带来的附加应力（相当于快速加载）；附加应力与孔隙压力的共同作用（相当于长期蓄水之后）；只有孔隙水压的影响（相当于长期蓄水后快速泄空）。结果表明，在浅层（150m）以上浅部地段快速泄空后可能会发生较小规模的地震，而在数公里深度的范围内发生较大规模地震的可能性不大。

序

国家“七五”重大攻关课题“长江三峡水库诱发地震研究”中的子课题“三峡工程地应力、孔隙水压、渗透率现场测试”，曾于1993年以文集《三峡坝区水库诱发地震研究——茅坪钻孔的现场测试与分析》的形式公开发表。我曾在为它写的序言中指出，本文集无论在原始资料的提供上，还是在研究问题的思路与方法上都极富科学价值。

三年后的今天，国家地震局地壳应力研究所在原工作的基础上，又将国家“八五”重大攻关课题“长江三峡地壳稳定性和水库诱发地震问题的深化研究”中的子课题“长江三峡坝区地应力场的综合研究”中的有关研究成果，再次公开发表，同样是十分值得庆祝的。这些成果不仅对三峡工程的设计决策再次提供了重要依据，而且也与其他大型水库诱发地震的预测提供了一个良好的范例。本书值得有关专业人员和关心三峡工程的人士阅读和收藏。

本书中所涉及的研究内容有一定的难度。首先是因为有人对当代的水压致裂地应力测量的常规做法本身提出了质疑，涉及到较为尖端的学术研究问题，即在花岗岩体中做水压致裂应力测量计算最大主应力值时，是否要考虑孔隙水压力问题。其次，在花岗岩体的致密段如何进行孔隙压力测量。由于国内外进行现场测量的先例很少，因而在技术上有其难度是十分自然的。作者通过近几年的努力给出了较为令人满意的回答。学术上的研究和人类的认识永无止境，但对当今的工程问题又必须作出科学而明确的回答，本书所进行的学术研究，紧密结合了现今工程建设中的需要，是值得欢迎的。

结合地应力、孔隙压力的测量结果，本书就三峡坝区及其邻近地区的地应力场问题进行了综合分析，并就三峡坝区附近的断层稳定性问题作了更深入的计算分析，给出了富有成效的成果，也是值得称道的。

胡海涛

1996.1

Integrated Research on The Stress Field and Pore Pressure at The Three Gorges Site

Preface

Achievements of the research project "In-situ measurement of ground stress, pore pressure and permeability over the Three Gorges area" subordinate to the key project "Study of reservoir-induced seismicity over the Three Gorges Site on the Yangtze River" listed in The Seventh Five-Year Plan were published in 1993 in a monograph entitled "*Study of reservoir-induced seismicity near the Three Gorges Dam—in-situ measurements and analyses at Maoping*". In the preface I wrote, "this collection is scientifically valuable in thoughts and methods both for original data gathering and for problem resolution".

Today, three years later, based on its previous works, the Institute of Crustal Dynamics has completed another monograph "Integrated Research on The Stress Field and Pore Pressure at The Three Gorges Site", which is a subject under the key project "An in-depth study of the ground stability and reservoir-induced seismicity over the Three Gorges site on the Yangtze River" of The Eighth-Five Year Plan. These works have provided once again the important data for the designing and decision-making of the Three Gorges project, and at the same time, set up a good example of reservoir-induced seismicity forecasting for other reservoirs. This book is worth reading and keeping for specialists and other readers who are concerned in the Three Gorges project.

Difficulties are involved in the studies. Firstly, some scholars have questioned the conventional stress measurement by hydraulic fracturing, which involves the frontier subjects in modern academic research, i.e. is it necessary to take pore pressure into account when maximum principal stress is calculated in stress measurement by hydraulic fracturing for granites. Secondly, as few examples of in-situ pore pressure measurement in compact granite are available both at home and abroad, it is, naturally, technically very difficult. However, the authors have put forward satisfactory answers to these problems through years of efforts. Although academic research and human understanding are endless, we have to give scientific and definite answers for the present engineering constructions. This book meets the demand of combining academic research closely with engineering construction, and is worth congratulation.

It is also praisable that, in collaboration with measurements of ground stress and pore pressure, the book analyses the stress field over the Three Gorges area and further studies and calculates with effective fruits the stability of the faults near the dam.

Hu Haitao
1996.1

目 录

地应力场研究

三峡工程及其邻区现今构造应力场的综合研究	王建军 (3)
----------------------------	---------

水压致裂法测量中的问题

三峡茅坪 800m 钻孔水压致裂法应力测量的可靠性	李方全 (35)
水压致裂法测量中的孔隙压力问题	苏恺之等 (46)
水压致裂法测量中用水柱静压力作为孔壁孔隙水 压力值的相对合理性	苏恺之 (55)
茅坪孔的 S_H 值与 S_H^* 值的分析对比	苏恺之等 (60)
茅坪孔的孔隙压力测量装置可靠性的模拟实验 ——“封隔器增压效应问题”的实验研究	刘瑞民等 (77)

孔隙水压力问题的研究

裂隙岩体多重网络渗流模型研究	周维垣等 (87)
简论岩石中的有效应力定律	尹健民 (99)
孔隙压力测量方法评述	苏恺之 (103)
致密岩体中的孔隙压力测量方法 ——用封口法做孔隙压力现场测定	苏恺之等 (111)
极低渗透率岩层中的孔隙水压力测量方法 ——短期加压法	苏恺之 (117)
孔隙水压力的基本原理	苏恺之等 (122)
方兴未艾的孔隙水压力研究	尹健民 (145)

水库诱发地震

根据原地应力测量资料评价三峡水库蓄水前后坝址附近 断层的稳定性	张伯崇 (151)
孔隙压力、断层滑动准则和水库蓄水的影响	张伯崇 (166)

Contents

On Ground Stress Field

- A synthetical study on the present tectonic stress field over the Three Gorges site and its surrounding area Wang Jianjun (3)

The Problems of Stress Measurements Hydraulic Fracturing

- Reliability of stress measurements by hydraulic fracturing from a 800m borehole at Maoping in the Three Gorges area Li Fangquan (35)
- Pore pressure in stress measurements by hydraulic fracturing..... Su Kaizhi et al. (46)
- Relative rationalness of taking borehole water head pressure as pore pressure in stress measurements by hydraulic fracturing Su Kaizhi (55)
- Analysis and comparison between S_H and S_H^* from the borehole at Maoping Su Kaizhi et al. (60)
- Modeling experiment of the reliability of pore pressure measuring system in the borehole at Maoping
- The pressure effect of packer Liu Ruimin et al. (77)

On Pore Pressure

- Multi-network modeling on vadous flows in fractured rocks Zho Weihuan et al. (87)
- On the effective stress law in rocks Yin Jianmin (99)
- Review on pore pressure measuring methods Su Kaizhi (103)
- Pore pressure measuring methods for compacted rocks
- Field measurement by plugging Su Kaizhi et al. (111)
- Pore pressure measuring methods for rocks of very low permeability
- A short term pressure method Su Kaizhi (117)
- Basic principles of pore pressure Su Kaizhi et al. (122)
- The study of pore pressure being in the ascendant Yin Jianmin (145)

Reservoir induced Seismicity

- Assessment of stability of the faults near the Three Gorges dam before and after reservoir impounding based on in-situ stress measurements ... Zhang Bochong (151)
- Pore pressure, criterion of fault slip, and influence of reservoir impounding Zhang Bochong (166)

地应力场研究

三峡工程及其邻区现今构造应力场的综合研究

王建军

(国家地震局地壳应力研究所)

一、引言

长江三峡水利枢纽工程是世界闻名的巨型水电工程, 战略地位重要, 安全要求很高。水库诱发地震是威胁大型水电工程安全的重要因素之一, 因而三峡工程蓄水诱发地震问题就成为众人瞩目的关键问题。目前, 关于水库诱发地震的成因, 大体可归纳为两类: 一是应力增强机制; 二是强度弱化机制。主张应力增强机制的人认为, 水体载荷增大了地壳应力, 即在库伦-摩尔破坏准则中, 由于摩尔圆半径增大而与破坏包络线相切, 岩体失稳而引发地震。强度弱化机制系指由于软弱结构面抗剪强度的降低出现突发性的失稳而发展。我国的研究人员在对水库诱发地震震例分析的基础上, 认为强度弱化机制可能是水库诱发地震的主要机制, 但是不管哪一种机制, 原始(天然)地应力状态都是关键性的基础资料, 如果对蓄水和诱发地震前后天然构造应力场的实际变化缺乏真正的了解, 所得到的结论总是带有很多推测的成分。因此本项工作是水库诱发地震研究的关键性工作。

三峡工程及其邻区的现今构造应力场的作用方向问题, 许多单位和学者已用不同的方法手段进行了深入的研究^[1], 因研究范围、方法和引用资料的不同, 或是由于学科的局限, 得到的结论有较大差异。目前关于三峡工程及其邻区的最大主应力作用方向有三种认识, 即 NWW 向至 EW 向以及 NE 向至 NEE 向。有不同看法是很正常的, 问题是对于三峡工程, 最终应有一个适用的结论, 以便于相关工作的开展与深入, 因此本项研究十分必要。

本项研究范围为北纬 $29^{\circ} \sim 33^{\circ}$, 东经 $107^{\circ} \sim 113^{\circ}$ 三峡工程区及其邻区。广泛搜集与研究区有关的反映地应力场的资料, 专门搜集江汉油田孔壁崩落资料, 从应力场演化、应力实测资料分析、震源机制解及地壳形变等方面做比较系统的综合与对比研究, 获得各种方法研究结果的共同特征及存在差异的原因, 探讨三峡工程及其邻区区域主应力场可能存在的分区性特征; 利用三峡邻区江汉油田孔(井)壁崩落资料研究三峡东部江汉油田地区的构造应力场。为三峡水库诱发地震问题及地壳稳定性综合分析提供可靠的应力场资料。

二、地质构造概况

1. 区域构造体系^①

本区位于秦岭与南岭两个复杂的纬向构造带之间偏西, 为新华夏系第三隆折带以南与

^①长江三峡水利枢纽工程水库诱发地震危险性的初步评价报告, 水电部, 1986.10.

淮阳山字型西翼反射弧的复合地区(图 1).

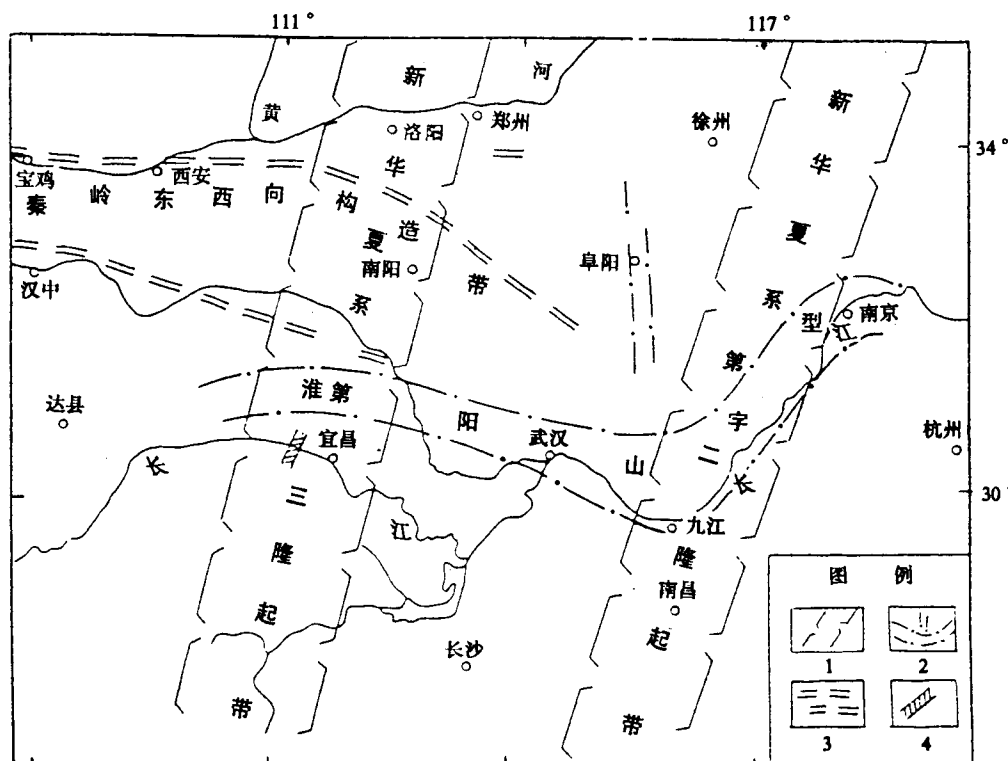


图 1 三峡工程及邻区大地构造略图

1.新华夏构造带; 2.山字型构造体系; 3.东西向构造带; 4.拟建三峡大坝坝址

库区的盖层构造构架, 主要受黄陵地块所制约, 与其外围构造组成了一幅复合的图像。从构造体系的划分, 黄陵地块呈背斜形态, 作为淮阳山字型西翼反射弧的砥柱, 其中基底的古构造被包容并遭受一定程度的改造复合。砥柱北部为反射弧前弧, 与大巴山弧形构造带呈斜接和重接关系; 南端为长江中下游东西向构造的长阳—五峰东西向褶皱带, 并与反射弧脊柱呈反接复合; 西及西南侧为新华夏系的川、鄂、黔褶皱带, 其构造线自南向北, 渐次由 NNE、NE 偏转为 NEE, 在川东、黔北、鄂西一带与长江中下游东西向构造复合, 构成向西突出的弧形构造, 它与北部的大巴山弧形构造在巴东、巫山、奉节一带构成向西撒开的喇叭形。

2. 区域构造概况

长江三峡水利枢纽三斗坪坝段, 位于黄陵背斜核部结晶岩地块南端, 属鄂西褶皱山地。区内长江总流向由西向东, 山间发育多级夷平面, 主要有五级, 自高而低的代表标高依次为 2000~1700m、1500m、1000m、800m 和 500m 左右。形成时代分别为白垩纪末、早第三纪末、晚第三纪末至早更新世和早更新世末。河谷两岸发育有六级阶地, 六级至三级生成时代为中更新世, 二级为晚更新世, 一级为全新世。

本区最大的构造为黄陵背斜, 黄陵背斜轴向呈 $N17^{\circ}E$, 南北向轴长 120km, 东西宽 80km, 形略呈穹窿状, 四周沉积岩层走向随背斜外形而扭转, 两翼岩层不对称, 西陡东

缓，西翼倾角 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ，东翼倾角 $8^{\circ} \sim 12^{\circ}$ ，南北两端倾伏 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ，为一不对称短轴背斜，背斜轴位于茅坪—天柱山一线。区内构造复杂，主要有淮阳山字型构造、纬向构造、弧形构造、新华夏系构造、经向构造等。另外有多条深大断裂，均体现了经历多次构造活动，具有继承性和新生性^①（图2）。现分别介绍如下：

1) 仙女山断裂

仙女山断裂由秭归的皂角村至渔阳关，全长约 90km，总体走向为 $N25^{\circ} \sim 15^{\circ} W$ 。北段 SW 倾，南段 NE 倾，倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。该断裂由一系列呈雁行排列的断裂组成，断面平直，沿负地形发育，且有高差 100~200m 的断层崖。该断裂水平断距大于 1000m，垂直断距不大，南北两段差异明显。

北段，反映出晚近地质时期为反时针张扭性质，继承了新华夏系应力场的特征，即具有大义山式断裂特点。

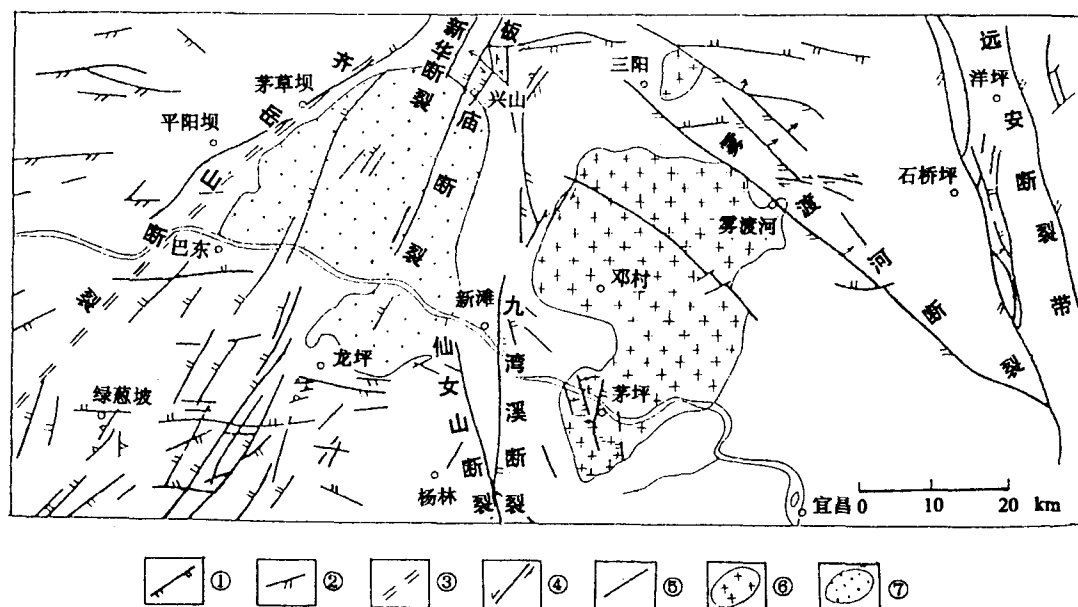


图2 三峡及邻近地区构造纲要图

①压性断裂；②压扭性断裂；③隐伏大断裂；④扭性断裂；⑤性质不同断裂；⑥火成岩体；⑦中生代盆地

南段，目前仅能证明是顺时针张扭性断裂，一般认为南段即为都镇湾断裂。仙女山断裂自侏罗纪末、白垩纪初生成以来，可把其构造运动分为三期：早中期属区域东西构造带的配套结构面，反映出顺时针扭动性质，然后北段被新华夏系归并，具有大义山式断裂特征——反时针张扭性质，晚近时期仍有活动。

2) 远安断裂

该断裂分东西两部分，分别位于远安地堑东西两侧，走向为 $N35^{\circ} \sim 5^{\circ} W$ ，大体平行，相对而倾，倾角 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，破碎带宽度为 10~30m，压扭性质。它主要断于上古

①长江流域规划办公室三峡勘测大队地质队，长江三峡地区主要断层调查报告汇编，1987。

生界三叠系、白垩系之间，在航磁、重力上有反应，卫片上线性清晰，断裂长约120km。断裂带上有小震发生，1969年马良4.8级地震就在该断裂带上发生，近期的跨断裂带的水准测量结果也表明，东西两断裂均有微量活动。

3) 天阳坪断裂

位于黄陵背斜南端和长阳复背斜北面，是分隔黄陵背斜和区域东西向构造带的分界线。断裂总体走向 $N50^{\circ}\sim 70^{\circ}W$ ，倾向SW，倾角 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。沿走向呈舒缓波状。出露长度60km。该断裂切穿白垩纪、震旦纪地层。有多期活动，天阳坪断裂的规模较大，但从东向西逐渐减弱，趋势明显。据跨断裂的水准测量资料，该断裂近期有微量活动。

4) 雾渡河断裂

该断裂走向 $N50^{\circ}\sim 60^{\circ}W$ ，倾向NE，倾角 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ，全长70km。形成时期为前震旦纪，震旦纪—三叠纪初活动微弱，侏罗纪末、白垩纪初活动强烈，并归并入山字型构造体系。新生代时期，呈阶梯状断块下降，并在东端控制白垩纪沉积，被新华夏系归并利用，成为其配套的张性结构面。经人工地震探测，属深部断裂。该断裂之北微震较多，南部则基本无震，对地震起着控制作用，推测该断裂可能是活动性断裂。

5) 九湾溪断裂

九湾溪断裂，南起秭归苏家坳，在路口子过长江，北止笔架山以南的巴东，由一组右行型斜列的断裂组成，全长约31km，走向为 $N10^{\circ}\sim 25^{\circ}E$ ，向西倾，倾角 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ，切穿寒武系及下二叠统。

九湾溪断裂明显地反映出其两种活动方式，即压扭（反扭）性活动和张扭（顺扭）性活动。至于九湾溪和仙女山断裂的关系，一般认为九湾溪断裂将仙女山断裂向北错开。九湾溪断裂在晚近时期的运动表现为差异性运动。但目前尚不知其强度和速率。

据跨断裂的水准测量资料表明，1977~1978年表现出东盘下降，平均速率为 $0.095\text{mm}/\text{a}$ 。

另外，沿九湾溪断裂地震活动较频繁，但一般震级不超过4级，约每12年一次，且多属浅源地震。

6) 板庙断裂与新华断裂

板庙断裂绕黄陵背斜西北端展布，呈向北凸出的弧形，1:20万巴东幅区测报告中提出该断裂已延伸到秭归盆地中；新华断裂位于板庙断裂西侧，走向NNE，倾向NW，倾角 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ，延长约50km。这两条断裂皆属压性断裂，前者属于淮阳山字形西翼反射弧构造成分，后者属于新华夏构造体系。

7) 齐岳山断裂带

推测为隐伏断裂，地表不见大规模断裂迹象，呈NE分布，有三个背斜，并有侏罗纪小盆地沿此方向展布，延伸长度大体北起秭归盆地的北西侧，向南经长梁、恩施，一直向西南延伸，沿断裂带断续出现的小断裂有齐岳山断裂、恩施断裂、建始断裂等。

3. 黄陵背斜的构造活动发育史

震旦纪以前，地壳的强烈活动，使黄陵地区古老的崆岭群发生剧烈变质和变形破坏，并有岩浆岩侵入，形成轴向为NWW展布的复式背向斜和相应的断裂构造。

震旦纪至三叠纪初，地层整合或假整合接触，地壳运动相对微弱，表现为平稳的隆起

-沉降运动,但以沉降为主,接受浅海—滨海相为主的沉积。

中、晚三叠纪初,黄陵地区地壳运动又进入相对活跃阶段,开始接受侏罗纪沉积,形成淮阳山字型构造雏形,区域东西向构造开始出现。

侏罗纪末、白垩纪初的构造活动,使侏罗纪以前沉积的岩层强烈变形,产生一系列环绕黄陵背斜的构造带。

早第三纪末,构造活动再次活跃,主要表现为新华夏系应力活动特点,在一对南北向反扭力的派生下,形成本区 NW-SE 向挤压应力作用,使黄陵背斜及整个三峡地区卷入以巫山—巴东为中心,轴向为 NNE 的大面积间歇性拱曲隆起的运动中。

第四纪以来,地壳运动继承了上述隆起特点,但范围更广,在黄陵背斜西侧的仙女山断裂和东侧的马良—远安等较大断裂的活动性最为显著。

4. 坝区主要断裂构造

坝区主要断裂带有高家冲断裂、狮子包断裂、长木沱断裂、太平溪断裂、黑崖子断裂,现分述如下:

1) 高家冲断裂

分布于左岸苏家坝至右岸高家冲一带,断裂面平直,延伸约 10km,走向为 $N10^{\circ} \sim 20^{\circ} W$,倾向 NE,倾角 $60^{\circ} \sim 85^{\circ}$,为前震旦纪发育的剪切性基底断裂,错动方向不明显,擦痕方向很乱,破碎带的形成至少有两期活动,先生成早期的裂隙,被闪长岩脉充填,后又沿岩脉再次活动。

在地貌上,多呈平坦的河谷,或沿山坡延伸,因未穿过震旦系盖层,新地层中未见活动迹象,故认为是条老断层。

该断裂带的影响带宽 4~9m,碎裂岩带宽 2~10m,局部有 0.5m 宽的角砾岩带,1.8~2.5m 宽的碎斑岩带,0.1~1.05m 宽的糜棱岩带,总宽度为 10~23m。

2) 狮子包断裂

分布于左岸苏家坝、狮子包至右岸风箱沟一带,总体走向近 NS,局部变化在 $N15^{\circ} E$ 至 $N20^{\circ} W$ 的范围内,倾向 W,倾角 $54^{\circ} \sim 82^{\circ}$,断裂带宽一般为 2.5~12m,构造岩以角砾岩和破裂岩为主,糜棱岩宽度一般小于 1m,碎块岩见于两侧,影响带宽一般为 4~7m,最宽达 19.4m,构造岩一般胶结良好,透水性差,主断面上有宽 0.5~1cm 的断层泥,在左岸 7 号硐内出露明显。

3) 长木沱断裂

长木沱断裂是坝段西部一条较大的断裂,出露于长木沱,向南在茅坪溪、文昌阁、杨贵店处零星可见,再向南被南沱砂岩掩盖,向北过长江由路家河延至龙潭河。由于江水上涨,在江边出露不明显。但在长木沱山顶木鱼观的韩家房后,断面清晰可见,产状为:走向 $N5^{\circ} W$,倾向 SW,断面上有大量擦痕,该断裂走向变化大,北部为 $N5^{\circ} \sim 15^{\circ} E$,倾向 NW 或 SE,倾角 $5^{\circ} \sim 62^{\circ}$,往南则转为 $N20^{\circ} \sim 30^{\circ} W$,后又转为 NNE。

破碎带发育于黑云母石英闪长岩体中,最大宽度为 30m,由糜棱岩、角砾岩、压碎岩和周围的挤压浸染带组成,胶结紧,质硬,但有时破碎带由节理密集带组成,现有资料表明,破碎带没有穿过盖层,和高家冲断裂一样,也生成于前震旦纪末期,是雪峰运动的产物。

4) 太平溪断裂

分布于太平溪之西,在公路上可见清晰露头,该断裂总体走向为 $N10^{\circ} \sim 30^{\circ} W$, 倾向 NE, 倾角 60° , 构造岩胶结坚硬,但受到后期破坏,有宽 $0.1 \sim 0.3m$ 片理化现象,沿断裂面有宽 $0.5 \sim 2cm$ 泥化带,质软性弱,断裂上盘透水性好。

5) 黑崖子断裂

分布在黑崖子之东,走向 $N20^{\circ} \sim 30^{\circ} W$, 倾向 NE, 倾角 75° 左右,断裂斜穿过长江,发育在闪长岩体中,延伸不到 $10km$ 。

三、构造应力场的演化

三峡工程由于所处的地质环境较为复杂,在地质历史和地应力场的演化过程中,既具有统一性又有地区性(局部)特征。因此,深入研究分析这一演化特征,对详细探讨地应力场的作用与不同时期断裂活动的关系具有重要的现实意义。

1. 元古代构造应力场

三峡及邻近地区的地壳在漫长的地质历史时期中,经历了多期构造运动和长期的演化发展过程。震旦纪前的晋宁运动奠定了基底构造,它是研究区内最强烈的一次构造运动,使前震旦系产生强烈构造变形和深变质,形成 NWW 向的紧密皱褶、断裂和岩浆岩的区域性展布。但在鄂西地区此时地壳活动性也较强,从黄陵一带出露的崆岭群建造分析,地槽早期以碱性火山岩为主,晚期为陆源碎屑岩,并从太平溪的赵家湾一带出露的席状超基性岩分布看,反映是优地槽构造环境。大约在 $2000Ma$ 左右的大别山运动时,使地槽回返、褶皱,转变为大别期古皱褶带。依据前震旦纪构造裂隙和构造变形特征,认为早元古代三峡及邻区应力场为近 EW 向挤压,使陆壳增生形成该区早期的陆壳和古老结晶基底。中一晚元古代初期,构造与沉积差异明显,地槽活动带在陆间或陆缘区发展形成,断裂作用加强。青峰断裂在此时已具有一定规模,其北侧出现规模较大的裂隙深槽,导致横向扩张和海底火山作用,形成基性-酸性火山岩与陆源碎屑岩组成的多旋回优地槽特征。青峰断裂以南在大别山、大洪山一带一套巨厚的过渡型陆屑-藻礁碳酸盐建造的冒地槽特征。大约在 $1000Ma$ 左右时发生的神农运动期间(晋宁),由于秦岭地槽深海的强烈扩张,导致自北而南的强大水平挤压,使区内前震旦系发生了板岩-千枚岩化变质,并产生一系列 NWW 向紧密皱褶和压性断裂(雾渡河断裂、板苍河断裂等),显示了 NNE-SSW 向的挤压作用。

2. 古生代应力场

古生代初期,地幔物质活动加剧,武当山地区开始隆起,使青峰断裂南北两侧的构造格局发生了变化。武当山以北地区形成早古生代地层的沉积,为次稳定型冒地槽。从震旦纪至泥盆纪地层厚度约为 $8000m$,其各系之间多作假整合接触,岩浆作用主要表现为碱性系列侵入,晚古生代转化为拗陷再生地槽,裂隙作用退缩到北秦岭地区。青峰断裂以南自震旦纪到二叠纪地壳持续沉降为稳定发展的地台区,主要为陆相-海相沉积,寒武系到二叠系呈假整合接触,没有岩浆侵入活动和区域变质作用,属于陆升陆降的平稳振荡运动,构造皱褶虽较轻微但也表现为近 EW 向。从总体地质构造特征看,水平挤压为 NNE 向。

3. 中生代应力场

印支运动期间, 青峰断裂以北地区的中元古代到中三叠世的各时代地层产生强烈变形, 形成一系列东西向紧密型褶皱和逆断层。在区域动力作用下, 使上古生代地层发生不同程度的变质, 形成板岩、千枚岩。从变质的线理和褶皱轴面和断层走向等多为近 EW 向, 反映出印支运动自北而南的推覆挤压作用。

青峰断裂以南地区为统一的大陆构造环境, 在黄陵一带结晶基底隆起, 在隆起两侧的秭归和当阳盆地内, 堆积了约 5000m 的侏罗纪陆相地层。

中侏罗到白垩纪的燕山运动早期, 在青峰断裂以北地区, 区域应力场仍以南北方向挤压为主。而青峰断裂以南地区, 早侏罗世地层普遍褶皱, 伴有强烈断裂作用。从构造变形特征可以看出区域应力场的主应力方向为 NW-SE 向。但由于此时期黄陵地区基底的隆起对区域应力场的阻挡作用, 致使西部和东部地区的应力作用方向产生差异, 即西部地区为 NW 向而东部地区为 NEE 向。

燕山运动晚期, 由于地球自转速度变化, 本区进入了新的造陆运动, 秦岭地槽褶皱带向南大规模推覆作用结束, 上扬子区转变成台褶皱带, 区域构造格架定型。在这一时期地壳运动是以升降为主的断块之间的差异调整。早期产生的 NE、NNW、NNE 和 NW 向压性断裂均表现为横向拉伸断陷, 形成一系列的小型山间断陷盆地, 接受了白垩纪河湖相陆屑沉积, 如远安、建始、仙女山等断陷盆地, 并在江汉盆地内沉积了厚约 8000m 的白垩系一下第三系, 由上述分析结果可以看出, 从燕山运动早期至燕山运动晚期, 研究区的北部和南部地区的应力场作用方向具有地区性 (局部) 特点。

4. 新生代应力场

早第三纪至晚第三纪期间的喜山运动, 是一次继承燕山运动一些特征后的强烈构造运动, 以整体大面积隆起为主, 并表现为侧向水平挤压, 致使一些主干断裂产生压性或压剪性活动。如 NNW 向断裂的仙女山和远安断裂带内的早期角砾岩中产生片理状断层泥和糜棱状片理、透镜状构造岩; NW 向断裂的天阳坪断裂的上盘古生代地层逆冲到红层之上, 石泉-房县断裂带内的石泉红层被挤压成横向隆起, 并产生一系列的 NNE 的剪切破裂 (右行剪切); NE-NNE 向断裂系统则产生张性和张剪性活动。从上述各种构造迹象表明, 喜山运动时期主要表现为整体性的 NE-SW 向的侧向挤压作用, 其力源来自西南方向。

5. 新构造应力场

新构造运动以来 (晚第三纪以后), 由于印度洋板块、青藏板块和菲律宾板块对太平洋和欧亚板块的挤压作用影响, 本区域的应力场作用方向由 NE 向转变成近 EW 向水平挤压, 隆起区扩大, 地壳厚度变薄, 软流层物质上隆, 重力作用产生均衡调整。由于水平挤压应力和垂直应力的相互叠加作用, 地区性 (局部) 应力场的作用特征更明显。

四、三峡工程区实测现今构造应力场

1. 葛洲坝地区的原地应力实测

1977~1981 年中国科学院岩土力学研究所和长江流域规划办公室研究院 (简称长办), 在葛洲坝地区用应变片钢环式孔径变形套芯解除法和水压致裂法进行了原地应力测