

岩体工程地质力学问题

(九)

中国科学院地质研究所 编

科学出版社

岩体工程地质力学问题

(九)

中国科学院地质研究所 编

科学出版社

1990

内 容 简 介

本文集总结了工程地质力学领域内的一些新的研究成果,共收入6篇论文,第一篇介绍一个坝址区岩体工程地质力学研究的原理和方法;第二篇介绍一个地下洞室工程中所进行的室内外岩体力学试验,讨论了不同结构条件、含水量条件和围压条件下的岩体强度;第三至第六篇文章分别是关于缓倾角断裂的勘测研究、活动断裂活动的评价原则、节理岩体弹性常数预测和有控压裂放顶的理论和设计等方面的研究论文。

本书可供工程地质人员,水电、交通、矿山工程勘测设计施工人员及有关院校师生参考。

岩体工程地质力学问题

(九)

中国科学院地质研究所 编

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990年9月第一版 开本: 787×1092 1/16

1990年9月第一次印刷 印张: 13

印数: 0001—1000 字数: 301 000

ISBN 7-03-001774-9/P·346

定 价 12.20 元

目 录

- 林县金牛山坝址岩体稳定性工程地质力学研究.....许学汉 郭 志 (1)
- 一项岩体地下洞室工程建设中的岩体力学特性研究.....
.....周瑞光 孙广忠 (56)
- 缓倾角断裂的勘测研究.....彭进夫 (148)
- 活动断裂活动的工程评价.....占 迅 (154)
- 断续节理岩体弹性常数的预测——复合材料理论在岩体力学中的初步应用...
.....寇日明 王思敬 (163)
- 有控压裂理论及大同云岗煤矿坚硬顶板放顶设计初步研究.....
.....张文彬 孙广忠 (180)

**PROBLEMS OF ENGINEERING GEOMECHANICS
OF ROCK MASS
(Vol. IX)**

CONTENTS

Engineering Geomechanical Studies about Stability of Rock Mass in Jinniushan Dam Site, Linxian Country.....	Xu Xuehan and Guo Zhi (1)
Study on the Mechanical Characteristics of Rock Mass in a Underground Work	Zhou Ruiguang and Sun Guangzhong (56)
Survey and Analysis of the Gentle Dip Fault	Peng Jinfu (148)
Evaluation with Regard to the Action of Active Fault	Gu Xun (154)
Prediction on the Elastic Modulus of Jointed Rock Mass—Application of Compound Material Theory in Rock Mass Mechanics	Kou Riming and Wang Sijing (163)
Preliminary Study of a Theory on the Controlled Hydraulic Fractures and the Plan of Falling Roof	Zhang Wenbin and Sun Guangzhong (180)

林县金牛山坝址岩体稳定性工程 地质力学研究

许学汉 郭志

引 言

水利水电工程建设是一项重要经济活动领域,枢纽工程是这一建设的基础与核心.做好枢纽区工程地质工作是十分重要的,在水利工程建设中主要有三方面稳定问题需要研究解决,即:工程规划和可行性论证有关的区域地壳稳定性;选坝、枢纽布置和水利工程设计相关的枢纽区岩体稳定性;以及工程长期作用对原有地质环境和稳定条件的反馈与影响.这三方面稳定问题既互有联系、又各具特点.谷德振教授曾高度概括地指出(1979):工程地质问题不管多么复杂,归纳起来是一个与工程有关的岩体稳定问题,控制这种稳定性的是地质结构.实践证明,以该理论基础而建立起来的工程地质力学,为全面系统研究枢纽区工程岩体特性和稳定性提供了科学原理和方法.

本文旨在通过一项工程实例,系统地总结与讨论大型水工枢纽区岩体特性与稳定性工程地质力学综合研究的理论、原理和方法.这种总结和讨论,对于交流和提高实践经验,不断充实和发展工程地质力学理论与方法,都是必要和有益的.由于作者水平所限,不当之处,敬请读者批评指正.

测试研究工作是在孙广忠教授指导下完成的.参加这项工作的除本文作者外,还有黄鼎成、赵然惠、陈诗才、张连弟、周瑞光等同志,当时林县工程指挥部给予很大帮助,在此一并致谢.

一、区域工程地质条件分析

(一) 区域地质特征

1. 区域地质建造特征

工程区位于太行山东麓林县境内淅河上游(图1).分布地层西部老、东部新,依次出露有太古界片麻岩,震旦系石英岩及石英砂岩,寒武系紫色页岩、鲕状和竹叶状灰岩以及奥陶系灰岩和白云岩,在区域东部还出露有石炭、二叠纪地层.此外,区内有燕山期中性闪长岩类沿南北向分布.在水库和坝址区,主要出露寒武、奥陶系,并有上第三系钙质砾岩沿淅河两岸零星分布,第四系主要为坡残积物、洪冲积物.坝址区河床覆盖层(冲积层)

厚 33 m。沿浙河两岸个别地点有崩坍堆积。

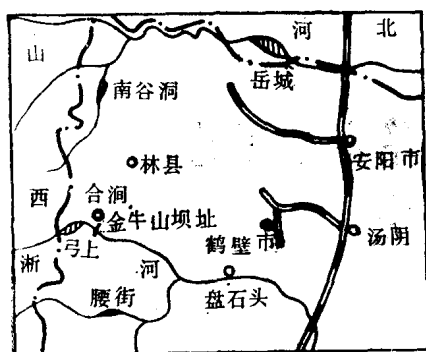


图 1 金牛山坝址地理位置示意图

系。

(2) 所有覆盖于基底之上的古生代地层，经历了古生代晚期的构造运动，在 NW-SE 向区域主压应力场作用下，形成了 $N40-60^{\circ}E$ 构造体系。

(3) 中生界盖层留下了燕山运动的形迹。其主要特征是：第一，燕山运动早期(大约在侏罗纪)显示强烈的近东西向主压应力场作用，形成了控制本区构造格局的近南北向构造体系。此一时期古生界盖层(甚至基底)中近南北向老断裂发生复活运动，并对南北向构造体系的形成和活动起控制作用；第二，到了中生代末期，燕山早期的近 EW 向应力场发生了细微变化，显示 NWW-SEE 向主压应力场的主导作用，在近南北向构造体系基础上继承、发展，形成 NNE 向构造体系。在这种背景下，近 SN 向 NNE 向断裂活动加剧，其中一些沟通老构造和基底构造的复活带，形成中性岩浆侵入活动的通道。例如图 2 中的东岗-曲山断裂带和鹿山-采桑-庙郊断裂带，都有这种岩浆活动。

经过上述各期构造运动，在广阔的太行山麓及其东部地区形成了特定的构造格架。从宏观上看，大致构成三个区域构

2. 区域地质构造特征

本区处于太行山复背斜东翼，地层总产状是近南北走向、倾向东、倾角 25° 以下。不同时代的地层经历了不同区域构造应力场作用(黄鼎成等, 1979)，其构造形变特征概括如下(图 2 和图 3)：

(1) 以赞皇群为标志的前震旦纪结晶基底，普遍发育 NWW-SEE 向构造线(片理、片麻理)，证明基底岩层当时在 NNE-SSW 向主压应力场作用下，形成这一套近东西向构造体

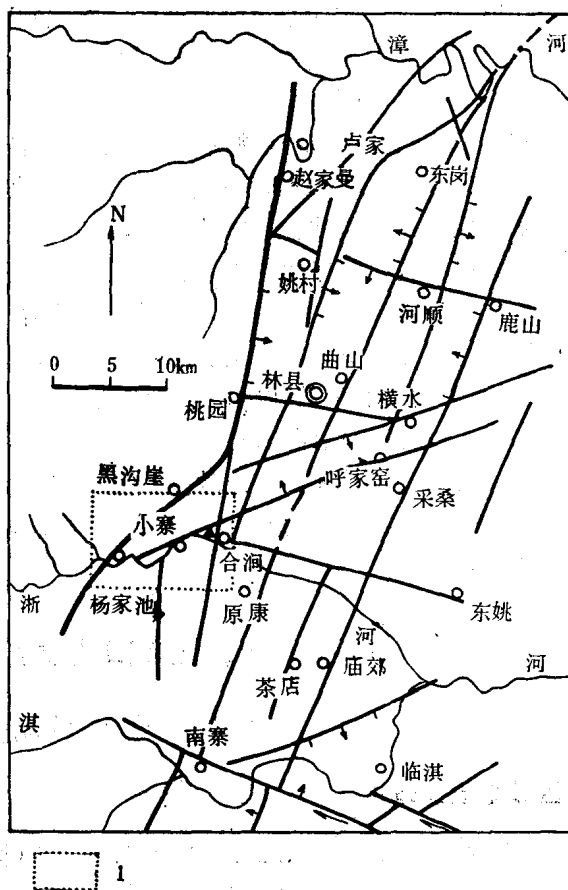


图 2 林县地区断裂构造纲要略图

(参考黄鼎成卫星影像分析图编制，图中 1 为图 3 范围线)

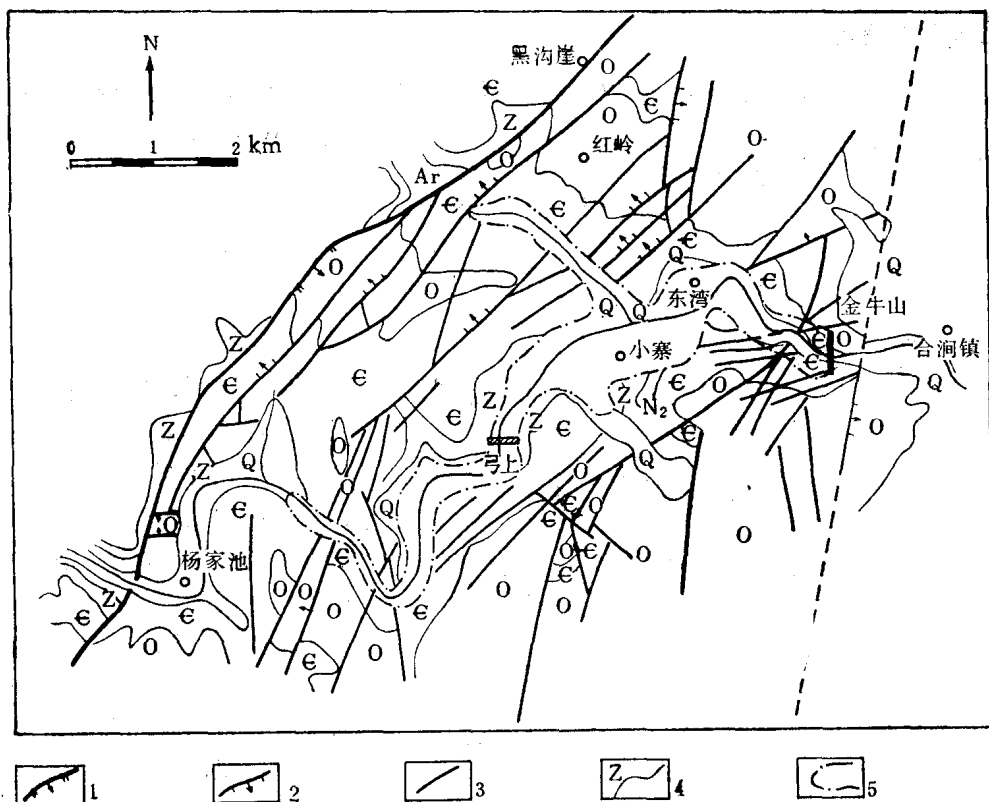


图3 杨家池—黑沟崖—合涧镇区域地质构造纲要图

1.区域大断裂 2.较大断裂 3.一般断裂 4.地层界线 5.水库回水线(高程500 m)

造单元,即西部太行山主体构成的整体构造隆起区(简称西部上升区 I);山前块断构造区(简称中部块断区 II),该区在图2中西界为赵家曼-桃园断裂、图3中的黑沟崖-杨家池断裂,东界为庙口-青羊口深断裂;东部平原大幅度沉降的断陷构造区(简称东部地堑区 III)(见图4)。

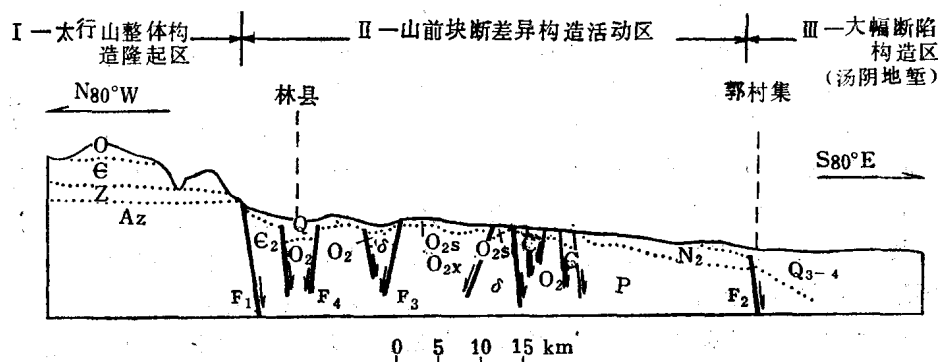


图4 太行山东麓林县地区新构造活动断裂剖面图

F₁: 赵家曼-杨家池断裂 F₂: 庙口-青羊口深断裂 F₃: 鹿山-庙郊断裂 F₄: 东岗-曲山断裂

3. 区域新构造特征

本区新构造活动是比较明显的(图4和图5)。自新生代以来,明显地继承了燕山末期

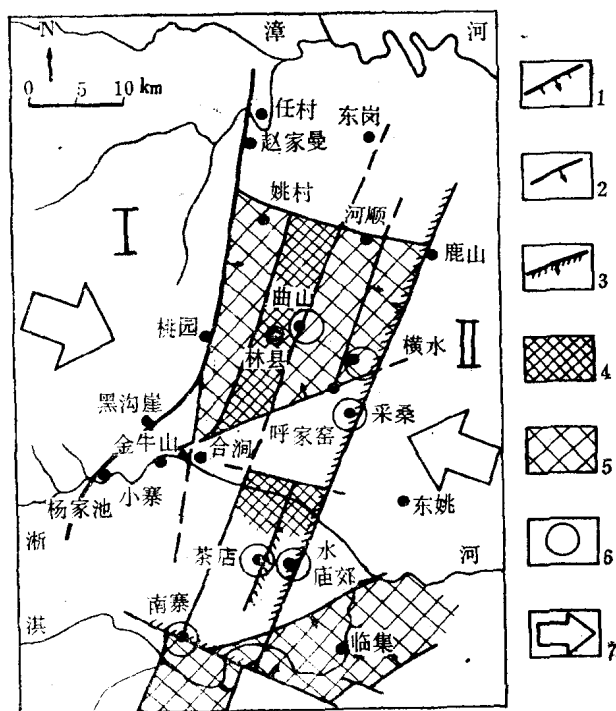


图5 太行山东麓林县地区新构造活动断裂略图

1. 新构造分区边界断裂 (I: 块断上升区; II: 块断差异活动区)
2. 区域新构造断裂
3. 现代活动断裂
4. 5. 新构造断陷盆地 (4. 第四纪沉降幅度 > 200 m 5. 沉降 < 200 m)
6. 现代(1966—1975)3级以上地震震中
7. 新构造、现代构造应力场

期 NW-SE 向主压应力场作用,因而全区的近 SN 向和 NNE 向断裂构造明显活动,表现为块断差异运动。例如,分割西区和中区的赵家曼-桃园山前大断裂以及划分中区与东区的庙口-青羊口深大断裂,第三纪以来都有明显的继承性复活运动,并且沿深大断裂还有新生代玄武岩分布(如鹤壁黑山玄武岩)。活动特征概括如下:第一,西盘相对上升,东盘相对沉降,使被它们分割的三个不同的区域构造单元的差异愈增,结果强化了太行山东部广大地区在东西方向上的新构造差异地貌景观。例如,西区隆起,同中区相对高差加剧(达 1000m 以上);东区加剧凹陷,形成地堑盆地,堆积了巨厚新生界(厚达数千米);同时中区也强化了断裂活动,断块山地地貌景观愈加显著,并沿赵家曼-桃园大断裂的东侧下降地段发育一系列叠加洪积扇

群。第二,山前块断构造区内 SN 向和 NNE 向断裂复活,各断块升降差异加剧并形成断陷盆地(如林县盆地,堆积第四系厚约 200 m)。有迹象表明,这种差异活动迄今尚未停止。明显证据之一就是,沿东岗-曲山断裂和鹿山-采桑-庙郊断裂自 1966 年以来频繁发生了 3 级以上地震。第三,在上述 SN 向和 NNE 向主构造线复活运动基础上,可能产生二个应力场的联合作用;也可能带动某些与之配套的 NE 向和近 EW 向(包括 NW-SE 向和 NEE 向)断裂的复活运动,例如林县断陷盆地的南部和北部边界断裂;还有迹象表明,可能在二组断裂交汇部位产生新活动,发生在林县与辉县交界地区的地震活动¹⁾(参见图 5 中南寨地震)可资证明。第四,庙口-青羊口为一埋伏于第四系之下的深断裂,有多期复活历史,沿断裂带分布的新生代基性玄武岩体说明它新构造活动深度达上地幔顶部,并表现为现代孕震、发震构造带(1830 年磁县 7.5 级大地震即为有力证据)。

1) 冯兴祥, 1976, 林县的地质构造和最近几年的地震活动, 开封师范学院学报, 自然科学版, 第 1 期。

4. 区域地震地质和地震活动特征

由赵家曼-桃园大断裂和青羊口-庙口深断裂所限定的山前块断构造区,第四纪以来断裂构造活动未止,因而酿成本区历史上和现代的地震活动。其地震地质基本特征和活动规律是:以青羊口-庙口深断裂复活运动为主导,带动整个山前块断构造区(有人称该区为太行山前大断裂带)发生断裂差异运动,产生一系列地垒和地堑,后者往往构成新生代、第四纪断陷盆地。断裂差异活动同时产生地震。大地震多集中在青羊口-庙口深断裂带上,例如历史上10次大于 $4\frac{3}{4}$ 级的破坏性强震,包括1830年磁县7.5级大地震,以及1966年邢台7.2级大地震,都是发生在该深断裂带中。中小地震则多发生在山前块断构造区内差异活动较为强烈的断裂带和断陷盆地边缘断裂带内,如横水、采桑、庙郊、茶店地震和曲山地震(参见图5)。区域地震地质特征和地震活动规律之所以如此,是因为地壳应力的大量累积多集中于深断裂带内,成为频度低而能量大的大地震发生区。而山前块断构造区尽管发育盖层大断裂,并且与深断裂构成一个系统、有一定程度的关联(例如1966年邢台大地震引起林县境内小震频繁活动),但毕竟缺乏与深断裂的直接联系,缺乏很深的构造活动背景(例如采桑-庙郊断裂和东岗-曲山断裂尽管分布有燕山期中酸性岩体,但也只能说该二大型盖层断裂深部活动不超过康氏面),加之这些盖层大断裂切割该区上部地壳,使地壳的完整性受到削弱,因而不易形成巨大能量的应力集中,造成地震能量(达到一定程度)随时释放的条件。由于这种特定的地震地质条件,使该区地震活动具有震级低、频度高、震源浅、小震群多和沿活动断裂呈带状分布等特点。

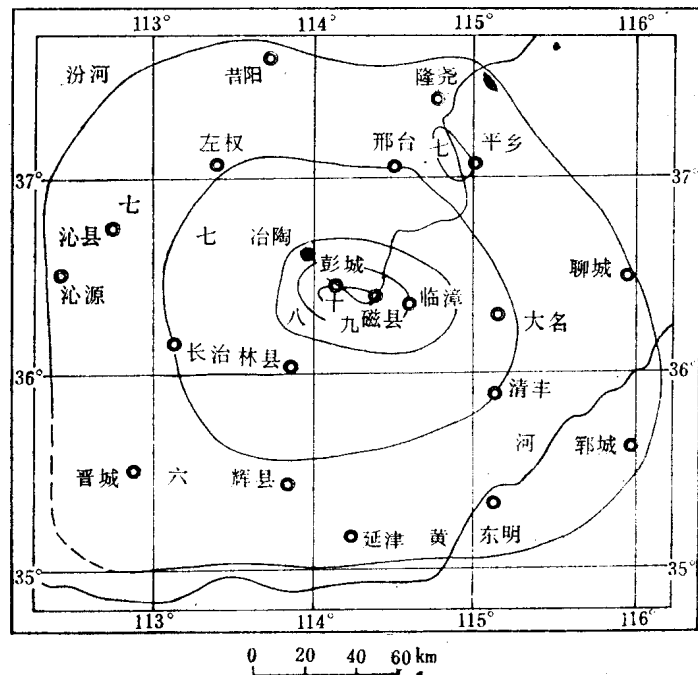


图6 1830年磁县大地震等震线图

上述地震活动事实和特征,一方面证明本区地壳现代活动性的存在,并且沿庙口-青羊口深断裂带活动强度最大,是活动带。另一方面,工程所在区域地壳活动性相对较小,从活动断裂和地震活动(表 1)对工程建设的可能影响程度评价,可以认为是相对稳定地块(地区)。图 6 是根据 1830 年磁县 7.5 级大地震绘制的等震线图。表 1 和图 6 资料表明工程所在地区地震基本烈度不超过 VII 度(国家地震部门鉴定的基本烈度为 VI 度)。

表 1 林县境内3级以上地震统计(1966—1975)

年份 地点	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975
横水		4				3				
曲山		5			3	3,3,3	3,3			3,3
采桑		4,3,3	4		3,3					
茶店、庙郊		3,3,3			4,3,3,3,3,3,3					
林县、辉县 交界		3,3,3,3,3			3,3	4				

表内 3 代表 3—3.9 级, 4 代表 4—4.9 级地震, 依次类推。依据冯兴祥于 1976 发表于开封师范学报(自然科学版)第一期文章《林县的地质构造和最近几年的地震活动》。

(二) 区域工程地质条件评价

1. 区域水文地质条件

水库分水岭高耸雄厚,岸边出露和分布的地层致密坚硬、隔水性好,限于局部发育的岩溶不存在大面积连通条件,地下水露头(泉水)高于设计回水线(图 3, 回水高程 500m),库区座落在基本完整的大型断块上,也不存在通向邻区谷地的集中渗流通道。因此,水库区域水文地质条件基本良好,属综合封闭单元,不存在向库外邻区渗漏问题,也不存在淹没、浸没和库岸坍塌再造问题。

仅在库首左岸断裂带(F₄₂)构成的单薄分水岭地段存在渗漏问题,将在坝址区讨论。

2. 区域基本工程地质条件

水库区域及其边岸地层、构造条件所构成的区域地质结构条件和水文地质条件基本良好,地表地质作用不甚强烈,物理地质现象不发育,天然边坡稳定性和地表稳定性较好。因此,从区域范围评价,其工程地质条件和地质环境是良好的。

3. 区域地壳稳定性评价

该工程(库、坝区)处于山前块断构造区,虽有大型盖层断裂切割地壳上层和表部,但与深部活动性大断裂缺乏直接联系。这一块断区存在新构造与现代构造活动,其东部边界庙口-青羊口深断裂带活动最强烈,是现代活动带和发震构造带。但是工程区距该活动断裂较远,不受直接影响,强震波及强度也不超过烈度 VII 度。据此可以认为:工程所

在地区的地块相对完整,地壳活动性相对较弱,不存在发生中强以上地震的发震断层,基本烈度不超过 VII 度。因此,从活动断裂和地震对工程建设的可能影响程度评价,本区属于相对稳定断块区。水库和坝址区地壳稳定条件良好。

二、坝址工程地质条件分析

(一) 地质构造特征

坝址位于太行山复背斜东翼,碳酸岩地层呈单斜构造,产状为 $355^{\circ}-5^{\circ}$, $E \angle 20^{\circ}$ 。

坝址区发育陡倾角断裂构造和缓倾角层间错动,局部发育节理、劈理密集带。

根据坝址区 118 条可测断裂(包括层间错动)统计,它们的产状特征如图 7 所示。根据断裂的产状、破裂结构面地质力学特征可以划分为 7 组(表 2)。对此 7 组断裂的地质力学分析结果表明,它们分别属于三个构造体系,即华夏系、新华夏系和南北构造系(表 2 及图 8)。这三个构造体系的时代问题,华夏系早于新华夏系,而且新华夏系成生于燕山期,这早已为前人定论。问题是要弄清楚南北断裂系在时间和空间演化上同该二者是什么关系。从区域和坝址资料分析,大致可以认为南北断裂系是最晚、最新的;从地震活动分析也说明,新华夏系与南北断裂系可能同时在活

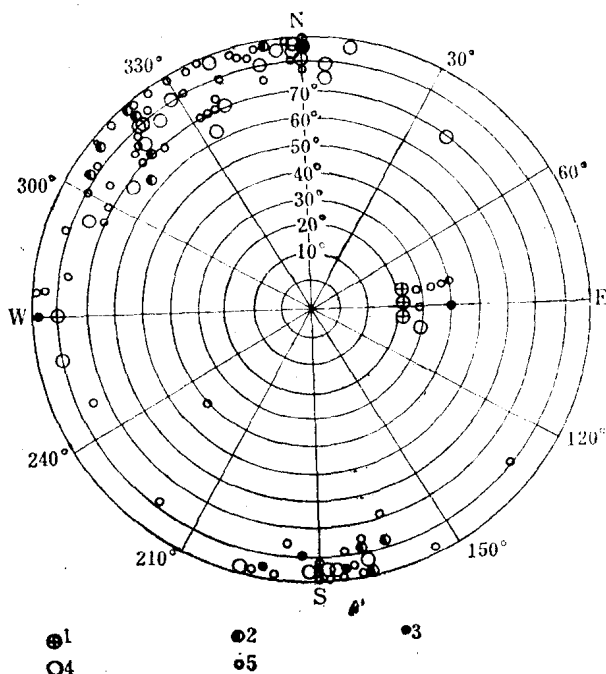


图 7 坝址区断裂构造极点图

1. 主要层间构造错动 2. 宽度 0.5—1 m 断裂 3. 根据钻探资料分析断裂 4. 宽度大于 1 m 断裂 5. 宽度小于 0.5 m 断裂 注: 共统计 118 条断裂

动。例如从坝址考察到,一条较典型的 NNE 向压扭性断裂被另一条近 EW 向张性平移断层所错动(图 9)。后者宽 25 cm, 断层带内隐约可见 NNE 向断层被牵引弯曲迹象, 还可见到由拖曳劈理组成的小扁豆体构造。这些微构造特征说明该东西向断层是一条顺扭张性破裂结构面。坝址区断裂构造的地质力学分析表明,这三个构造体系的形成,总的是在大致南北向的左旋区域应力场作用背景下所派生的 NW-SE 向至近 EW 向主压应力场作用的产物。三个体系的应力场及其演化见图 8。地震活动证明,新华夏系和南北系的应力场作用现代仍有显示。在坝址区南北系活动最突出。据统计,三个体系的断裂占坝址区断裂总数的 94%, 而各个体系在坝址区的发育并不平衡(表 3): 华夏系占 30.5%, 新华夏系占 8%, 南北系断裂占 55.5%。为什么会有这种差异? 这同该坝址区所

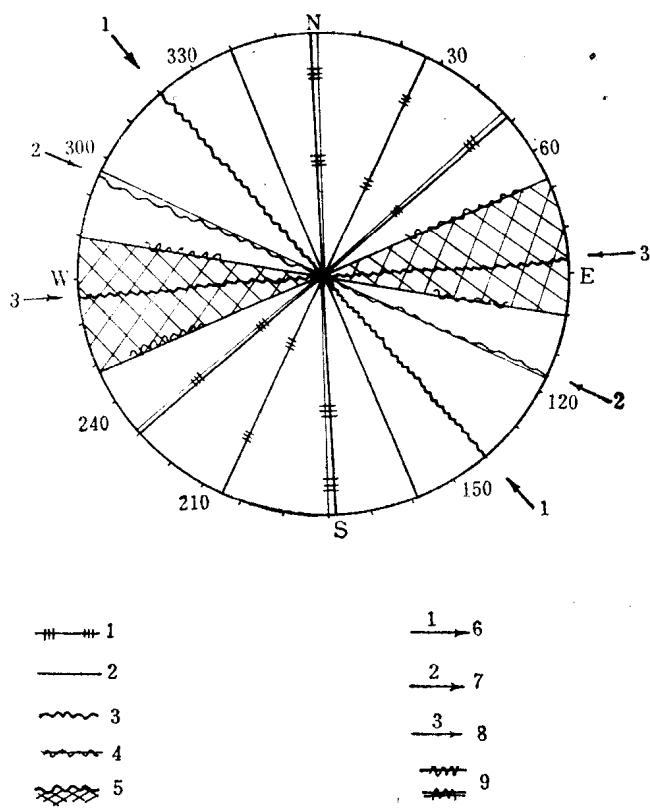


图 8 坝址构造应力场—构造体系及其复合关系图

1. 压性破裂结构面 2. 扭性结构面 3. 张性(包括追踪)断裂结构面 4. 张扭性结构面(改造前期构造) 5. 构造体系复合追踪造成的张性破裂结构面和张性破碎带 6. 华夏系主压应力场 7. 新华夏系主压应力场 8. 南北系主压应力场 9. 构造复合

处空间位置有关。坝址区位于南北向压性为主的林县大断裂带西侧上升断块区,这个地区所显示的构造应力场特征主要是近东西方向的水平主压应力作用,最宜产生大量的南北系构造成分。实际情况正是如此。如坝址区普遍发育有 SN 向陡倾角压性断裂和缓倾角层间压扭性构造错动带,以及 NEE 向扭性断裂。尤其值得强调的是,近 EW 向以张性为主的断裂和其它构造成分(如张性构造破碎带、节理劈理密集带)最为发育,几乎占坝

表 2 坝址区断裂构造分组

组别	组 称	产 状	主要地质力学性质	所属体系
1	近东西组	75°—90°, NW 或 SE ∠ 75°—90°	张	南北系
2	北东组	40°—60°, NW ∠ 65°—90°	压	华夏系
3	北东东组	65°—70°, NW ∠ 60°—90°	扭	南北系
4	南北缓倾角组	350°—5°, NEE—SEE ∠ 20°—30°	压	南北系
5	北北东组	20°—35°, NW ∠ 70°—85°	压(扭)	新华夏系
6	北西西组	280°, NE 或 SW ∠ 75°—90°	扭	华夏系
7	南北陡倾角组	355°—5°, SWW—NWW ∠ 80°—90°	压	南北系

址断裂总数的三分之一。近 EW 向断裂构造之所以最发育是因为：(1)经过前两期构造作用，已在坝区岩层中产生了相当数量的近 EW 向构造结构面(包括节理)，它们在 EW 向主压应力场作用下极易发展形成追踪型式的张性断裂；(2)改造华夏系 NWW 向扭性结构面和新华夏系不太发育的 NEE 向扭性结构面，使它们(在近 EW 向主压应力作用下)兼具张性之后一并归入 EW 向断裂构造；(3) SN 系的某些成分(NEE 向结构面)在 EW 向主压应力长期持续作用下，也可能转化为兼具张性的近 EW 向破裂结构面；(4)上述三种情况综合在一起的场合，往往形成规模较大、张性为主的近 EW 向构造破碎带，例如左岸 F_{42} 、右岸 F_{101} 就是典型例证(图 10 和图 11)。必须指出，坝址区断裂构造曾受多期的不同应力作用，使其地质力学属性失去单一性(原生地质力学性质)而变得较复杂，不但东西向破裂结构面表现最明显，甚至在东西向主压应力持续作用下，NE 向和 NEE 向以及 NW 向与 NWW 向等各组结构面都显示经受不同程度的张应变的改造作用。介于 F_{42} 和 F_{101} 之间地段，亦即全部坝基范围内的断裂发生这种改造作用的迹象最为明显。这一点，对于工程的实际意义是不容忽视的。

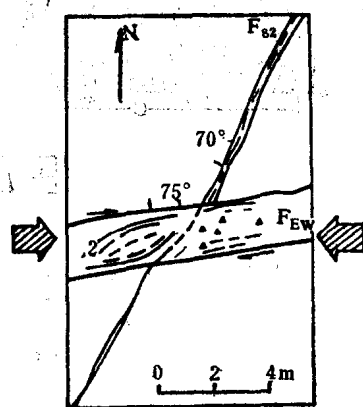


图 9 东西向断裂错动北北东向断层平面素描略图

1. 坝址区东西向主压应力场 2. 压扭性小型牵曳扁豆体构造 F_{62} : 25°, NW $\angle$ 70° F_{6W} : 80°, NW $\angle$ 75°(内部结构为实地素描)

坝址区断裂构造所显示的构造体系、构造复合以及构造应力场等特征，还可从岩层中发育的一般构造节理得到验证。例如，右岸平峒中三块岩体原位试件 16 条构造节理面地质力学性质统计素描结果，完整地显示出三个构造体系及其相应构造应力场特征(图 12)；左岸平峒中二块岩体原位试件 12 条构造节理面地质力学属性也显示了南北体系及其应力场特征(图 13)。

表 3 三个体系断裂在坝址区发育程度

构造体系名称	占坝址区断裂总数(%)	
	整个体系	体系中各成分
华夏系	30.5	北东组压性 24.5
		北西西组扭性 6.0
新华夏系	8.0	北北东组压扭性 8.0
南北系	55.5	南北向组压性：缓倾角组 9.0；陡倾角 3.0
		北东东组扭性 12.0
		东西向组张性 31.5

注：三个体系断裂总和占坝址区断裂总数的 94%，其余 6% 的断裂，产状分散未予统计。

根据上述断裂构造发育特征和规律，利用河床钻探资料进行分析，将河床断裂构造分析结果表示于河床基岩地形图(根据钻探资料编制)上，并与两岸出露的同一条断裂相衔

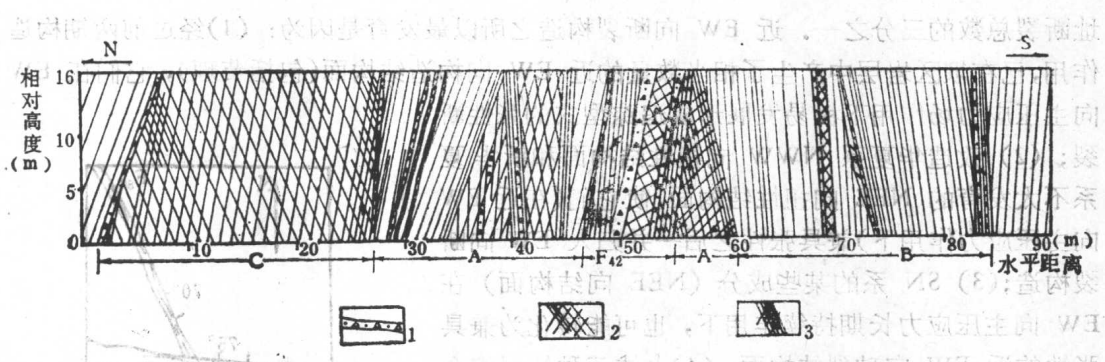


图 10 F_{42} 断裂带结构特征实测剖面

1. 破裂结构面(断层) 2. 节理、劈理面及其密集带 3. 极破碎节理、劈理密集带 F_{42} : 有三个主断面, 从北而南产状为: 80° , $NW \angle 80^\circ$; $75^\circ-80^\circ$, $NW \angle 81^\circ-90^\circ$; 275° , $NE \angle 80^\circ$, 中间者最宽(1m) A. 断层严重影响带, 岩体破碎, 块径 10—50 cm^3 , 局部角砾化 B. 断层影响带, 裂隙发育, 岩体较破碎 C. 断层轻微影响带, 岩块 80 cm^3

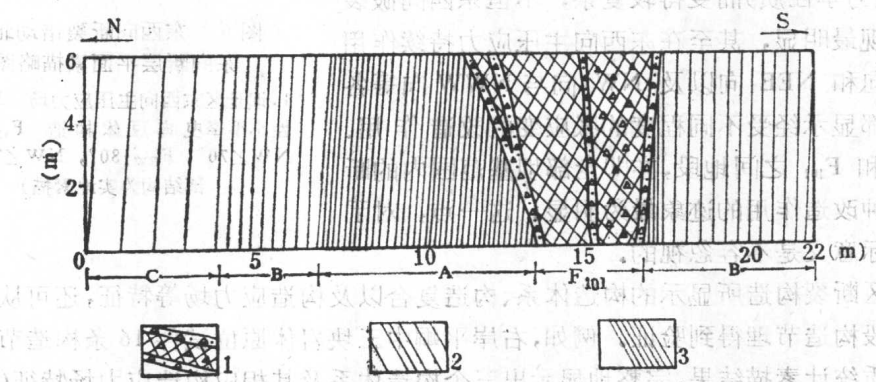


图 11 F_{101} 断裂带结构特征实测剖面

1. 主断裂带 2. 节理面及节理带 3. 节理、劈理密集带 F_{101} : 有三个主断面, 从北而南产状为 83° , $SE \angle 78^\circ$; 90° , $S \angle 88^\circ$; 280° , $NE \angle 82^\circ$, 其间为断层破碎带 A. 断层严重影响带, 岩体破碎, 块径 5—17 cm^3 B. 断层影响带, 岩体较破碎, 块径 20—30 cm^3 C. 轻微影响带

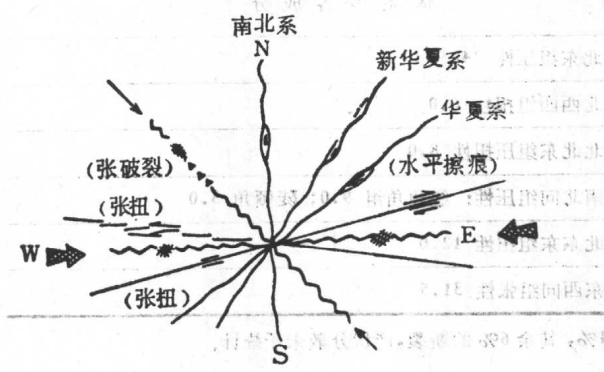


图 12 右岸 7# 响试件构造节理显示三个构造体系及其应力场平面示意图

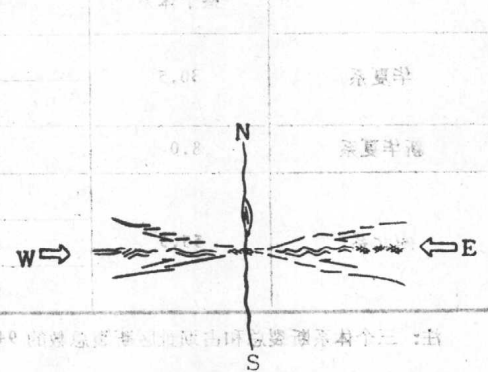


图 13 左岸 6# 响试件构造节理显示南构造体系及其应力场平面示意图

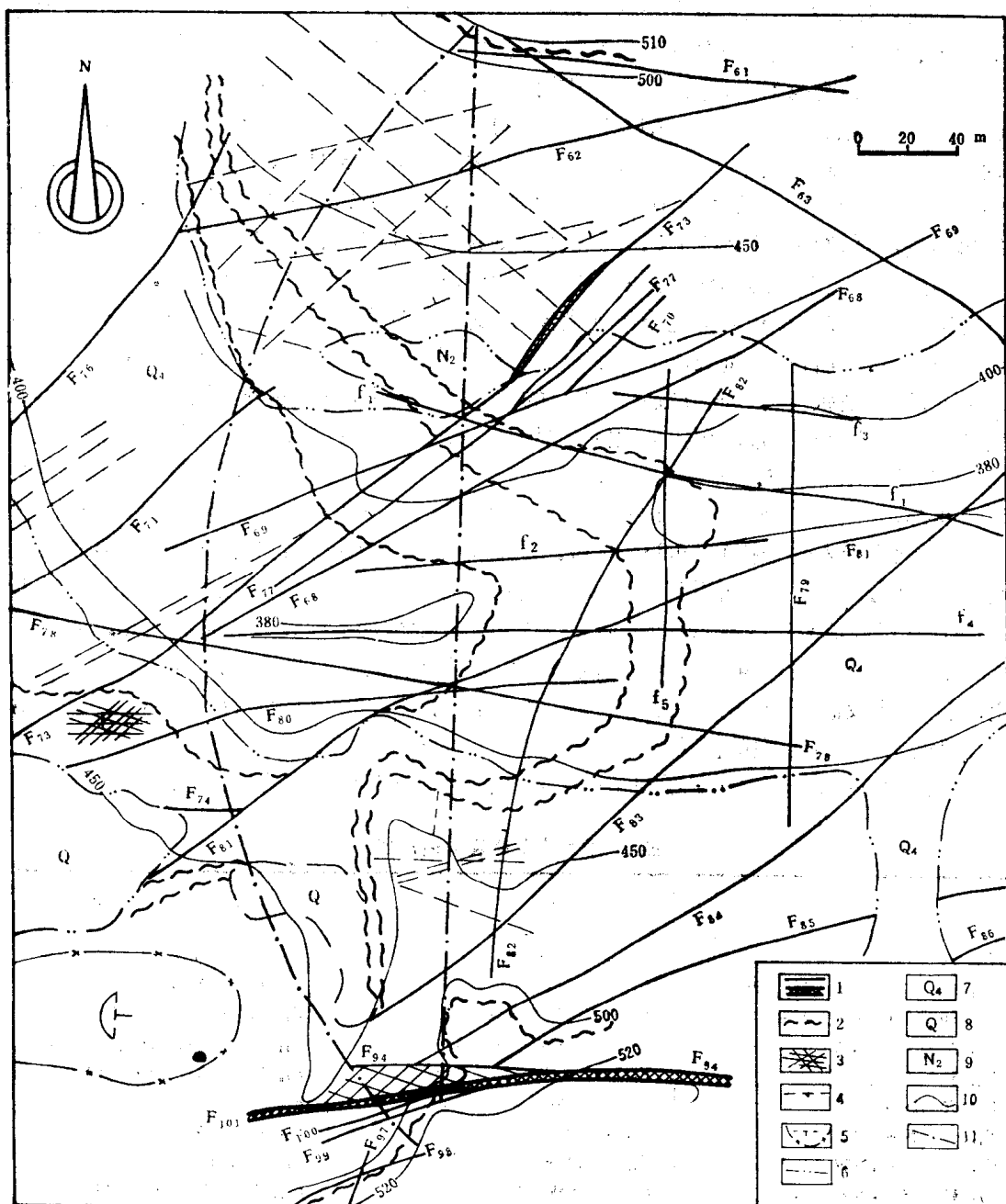


图 14 坝址主要断裂构造网络图

1. 断层、断裂带 2. 层间构造错动 3. 节理、劈理密集带 4. 大型构造节理 5. 滑坡体、滑向及范围 6. 第四系与基岩界线 7. 第四系全新统 8. 第四系 9. 第三系上新统钙质砾岩 10. 基岩面等高线 11. 重力坝(直线)与拱坝(弧线)轴线

接,可以得到全坝址区断裂构造网络及分布特征。综合坝址区全部断裂构造资料,选择与工程密切相关的主要断裂编制坝址断裂构造网络图(图 14),其产状列于表 4,它们是坝址岩体结构分析的基础和依据。

坝址区断裂构造除表现上述时空演化和发育特征外, 它们的发育频度和规模亦有明显特征. 河谷区较两岸以外区段发育频度高, 例如, 在沿坝轴线方向 (SN 向) 贯穿坝址全区 895 m 长度范围内, 分布有 32 条断裂和 5 条较大规模层间构造错动带, 其密度系数 (定义为每米条数, 以 % 计) 为 4.14%, 断裂构造平均间距为 24.2 m; 但在河床及两岸 (坝轴线 460 m 长度范围内) 发育有 24 条断裂, 其密度系数为 5.21%, 平均间距为 19.2 m. 此外, 在坝轴线范围内还分布有 10 条大型构造节理, 如果将其同断裂一并考虑, 则坝轴线上的构造密度系数将增大到 7.4%, 平均间距则减小为 13.5 m. 断裂构造在坝轴线每百米长度内的累计宽度可达 4.56 m. 断裂构造在个体发育规模上也有规律可循. 一般地说, 复合断裂构造较单一断裂构造个体规模大, 在宽度上最为明显, 这里以“宽长比”这一定量概念来表示. 复合构造宽长比值大于单一构造; 在单一构造体系或在各个体系互不干扰的场合, 往往是张性构造成分较其它成分的宽长比大得多, 扭性成分宽长比相对最小, 压性构造的宽长比介于张性和扭性之间. 根据库、坝区断裂构造统计, 各组断裂构造 (个体) 的宽长比示于表 5. 从中可看出, 在基本不受干扰的场合, 东西组 (张性) 宽长比平均值为 0.75, 北东组 (压性) 平均值在 0.41 至 0.64 之间, 而 NEE 和 NWW 两组 (扭性) 的最小值 (意味着未受干扰) 为 0.33—0.40. 这恰好证明个体断裂的宽长比张性 > 压性 > 扭性这一规律. 从表 5 还可看到, NEE 组先扭后张的复合构造的宽长比平均值高达 1.19—1.61, 其最高值可达 3.0, 说明构造复合作用显著地增加了破裂结构面的宽度. 在坝址区 F_{42} 和 F_{101} 两条东西向张性为主的复合断裂带具有最大的宽长比. 断裂构造的宽长比, 在理论上反映了个体断裂在发育规模上宽度与长度之间一定的内在联系; 在实践上, 可以根据宽长比由断裂的露头宽度推求断裂可能的延伸长度. 这对于进行构造分析和研究岩体结构特征、岩体力学介质类型以及岩体稳定性分析都具有重要意义.

表 4 坝址主要断裂构造产状

左 岸	河 床	右 岸
F_{79} 90°, S $\angle$ 75°—90°	F_{48} 60°, NW $\angle$ 70°	F_{81} 70°, NW $\angle$ 89°
F_{80} 60°—70°, SE $\angle$ 85°—90°	F_{71} 50°, NW $\angle$ 80°—85°	F_{83} 40°—50°, NW $\angle$ 75°
F_{81} 80°—90°, SE $\angle$ 89°—90°	F_{73} 50°—55°, NW $\angle$ 85°—90°	F_{84} 50°, NW $\angle$ 80°—85°
F_{82} 75°—80°, NW $\angle$ 75°—90°	F_{77} 50°, NW $\angle$ 80°—85°	F_{85} 270°—280°, NE $\angle$ 70°—80°
F_{83} 300°, SW $\angle$ 75°—85°	F_{78} 280°, SW $\angle$ 89°—90°	F_{86} 270°—275°, SW $\angle$ 80°—90°
F_{88} 60°, NW $\angle$ 70°	F_{79} 5°, NW $\angle$ 85°—90°	F_{87} 360°, W $\angle$ 80°
F_{89} 65°, NW $\angle$ 70°	F_{80} 85°, NW $\angle$ 85°	F_{88} 45°, NW $\angle$ 75°
F_{70} 45°—50°, NW $\angle$ 85°—90°	F_{81} 70°, NW $\angle$ 88°	F_{89} 75°, SE $\angle$ 78°
F_{72} 40°—45°, NW $\angle$ 50°	F_{8130} 30°, NW $\angle$ 70°	F_{100} 80°—85°, NW $\angle$ 89°
F_{73} 50°—55°, NW $\angle$ 85°—90°	F_{81} 50°, NW $\angle$ 75°	F_{101} 80°—85°, SE $\angle$ 70°—85°
$e_1^j(2)$ 360°, E $\angle$ 21°	f_1 280°—285°, SW $\angle$ 85°	$e_1^j(1)$ 355°—360°, E $\angle$ 21°
$e_1^j(1)$ 355°—360°, E $\angle$ 21°	f_2 85°, SE $\angle$ 85°	$e_1^j(2)$ 355°—360°, E $\angle$ 21°
$e_1^j(5)$ 355°—360°, E $\angle$ 20°	f_3 275°, SW $\angle$ 80°	
	f_4 90°, N $\angle$ 85°—90°	
	f_5 360°, W $\angle$ 85°—90°	
	$e_1^j(2)$ 355°—360°, E $\angle$ 21°	
	$e_1^j(1)$ 355°—360°, E $\angle$ 21°	
	$e_1^j(5)$ 360°, E $\angle$ 20°	