

三峡工程库首区及狮子口重力滑动构造系统的构造应力场研究*

宋利好 杨森楠 吴树仁 任建业

(中国地质大学, 武汉)

摘 要 基于野外实测和室内测试、计算分析及有限元模拟,对三峡工程库首区燕山期和喜山期的区域构造应力场以及狮子口重力滑动构造应力场进行研究。区域构造应力场的主要特征是:燕山期 σ_1 和 σ_2 近水平,分别近S-N向和E-W向, σ_3 近直立,差异应力200MPa,变化范围150~250MPa;喜山期 σ_1 近水平,总体方向NE70°-SW250°,差异应力100MPa,变化范围80~120MPa。在空间变化上,前者表现为南部差异应力高于北部差异应力,后者的变化规律不太明显。狮子口重力滑动构造系统的应力场比较复杂,总体呈近E-W向的前缘挤压、后缘拉伸,而滑动系统内部叠置产出的三个滑块也分别表现出后缘拉伸、前缘挤压并交替出现的特点,反映了区域应力场背景下的局部构造应力场特征。

关键词 构造应力场 重力滑动构造 黄陵背斜 长江三峡

1 引言

三峡工程库首区概指黄陵背斜周围地区,大地构造位置属扬子地台中部。据地层岩石组合及其接触关系,该区可划分出四个基本构造层和若干构造亚层。狮子口地区位于黄陵背斜之西翼南段(图1)。1985年以来,狮子口线性影像带的发现^[1],以及由此而展开的工作^[2,3]使该区的地质构造问题成为三峡工程地质地震论证过程中的关键问题之一^[4]。

作者研究成果^[2]揭示出该线性影像带是一个重力滑动构造系统在遥感图像上的显示,在地表长约8km,宽约3km,呈NNW-SSE向展布,剖面结构表现为一个由下伏系统、滑动系统(包括下、中、上三个滑块)组成的多层次滑褶型重力滑动构造系统。就其成因机制而言,重力滑动构造系统的形成和发展,既有区域构造应力场作背景,又受局部构造应力场的控制。本文拟

本文1995年6月收到,10月改回。

*中国地质大学(武汉)长江三峡狮子口地区重力滑动构造研究成果之一,获地矿部94年度勘查成果二等奖,研究人员还有姜本鸿、秦兴黎、刘子忠等。

- 1) 地矿部遥感中心。三峡遥感信息与坝址稳定性评价。1985。
- 2) 长江水利委员会勘测科研所。狮子口NNW向线性影像论证报告。1986。
- 3) 湖北地矿局遥感站等。长江三峡狮子口地区地质构造调查报告。1988。
- 4) 长江三峡工程论证地质地震专家组。长江三峡专题论证报告之一,附件。1988。

第一作者简介:宋利好,男,副教授,1956年生,1980年毕业于武汉地质学院,1990年获硕士学位,主要从事遥感地质学、构造地质学的教学和科研。通讯地址:武昌喻家山鲁磨路,中国地质大学地球科学院构造地质教研室;邮政编码:430074。



图1 黄陵背斜周围地区地质构造略图

Fig.1 Geological structure sketch map in Huangling anticline

1—3. 后地台构造层; 1. 第四系亚构造层; 2. 白垩—第三系亚构造层; 3. 上三叠统一侏罗系亚构造层; 4. 震旦系—中三叠统盖层构造层; 5. 中—新元古界似盖层构造层; 6. 新太古—早元古界基底构造层; 7. 晋宁期中酸性侵入岩类; 8. 正断层; 9. 逆断层; 10. 平移断层; 11. 性质不明断层; 12. 线性影象带。断裂名称: ① 房县—青峰断裂; ② 阳日—九道断裂; ③ 新华断裂; ④ 牛口断裂; ⑤ 水田坝断裂; ⑥ 雾渡河断裂; ⑦ 远安断裂; ⑧ 天阳坪断裂; ⑨ 仙女山断裂; ⑩ 松园坪断裂; ⑪ 狮子口重力滑动构造系统。

1. subsynthem of Quaternary; 2. subsynthem of Cretaceous—Tertiary; 3. subsynthem of Triassic—Jurassic; 4. cover synthem of Sinian—middle Triassic; 5. cover—like synthem of middle—new protozoic; 6. basement synthem of new Archean—early Protozoic; 7. intermediate—acid intrusive; 8. nonnal fault; 9. reversed fault; 10. strike—slip fault; 11. the fault of unknown nature; 12. lincement zone; ① Fangshan—Qinfeng fault; ② Yangri—Jioudao fault; ③ Xinhua fault; ④ Nioukou fault; ⑤ Shuotansha fault; ⑥ Wuduhe fault; ⑦ Yuanan fault; ⑧ Tianyangping fault; ⑨ Xiannushan fault; ⑩ Shongyuanping fault; ⑪ Shizhou gravity gliding structure system.

查表(岩石力学参数手册, 1991)得到不同岩石类型的 σ_c 、 k 值, 用上式对 2.1(1) 中之 53 个观察点的共轭节理进行计算分析。结果表明, 对应于南北向挤压变形期的差异应力值较高, 约

从这两个方面来探讨它们的特征和动力学背景。

2 库首区区域构造应力场

2.1 区域构造应力方位的确定

(1) 用共轭节理确定主应力方位 对区内 104 个观察点上共轭节理的测量结果(数据略)作赤平投影分析得到: 区内最大挤压应力 σ_1 近水平, 倾伏角一般 $< 25^\circ$; 挤压方向分为两组, 一组近 S—N 向, 另一组是 $NE70^\circ$ — $SW250^\circ$ 方向。

(2) 用断层擦痕反演确定主应力方位 对区内主要断层 35 个观察点上的擦痕资料投影后, 主应力可分为两组, 一组近 S—N 向, 另一组为 $NE60^\circ$ — $SW240^\circ$ 左右, 与共轭节理求得的主应力方位相似。

(3) 用显微构造确定主应力方位 用于确定主应力方位的显微构造标志有微裂隙及其脉体、压溶缝合线、双晶扭折带、显微透镜体等。对本区 14 个观察点上获得的以上标志求得的主压应力方位有两组, 一组近 S—N 向, 另一组为 $NE70^\circ$ — $SW250^\circ$ 左右。

上述三种方法求得的区域构造应力方位近于一致, 说明资料和结果均可信。

2.2 古应力值的定量估算

采用岩石破坏准则对区域构造应力场的古应力值进行定量估算。据断裂极限状态的包络线方程 $\tau_c^2 = \frac{k}{\sigma_1} (\sigma_1 - \sigma_n)^2$ 变换后, 得到在共轭断裂的极限应力状态下, 主应力与共轭角之间的关系:

$$\sigma_1 = -\frac{\sigma_c(\sigma_c - 4k)}{4(\sigma_c - 2k)} + \frac{\sigma_c - 2k}{2} \left(\frac{1}{\cos\theta} - \frac{1}{2\cos^2\theta} \right)$$

$$\sigma_3 = -\frac{\sigma_c(\sigma_c - 4k)}{4(\sigma_c - 2k)} - \frac{\sigma_c - 2k}{2} \left(\frac{1}{\cos\theta} + \frac{1}{2\cos^2\theta} \right)$$

式中, σ_c 为单轴抗压强度, θ 为共轭断裂锐夹角, k 为岩石的粘结强度。

200MPa, 对应于 NE70°—SW250° 方向挤压变形期的差异应力值较低, 约 80~120MPa。

2.3 区域构造应力场的期次

前人研究资料表明^{[1],[2],[4]}: 本区区域构造应力场主要分为两期: 一为近 S—N 向挤压的燕山主期构造应力场, 以区域上近 E—W 向的盖层褶皱束、断裂的展布及其活动特征为代表; 另一期为 NE—SW 向的喜山主期构造应力场, 以区域上某些 NNW 向断裂和上第三系、白垩系红色盆地的褶皱和共轭节理为代表。本次工作发现的若干证据, 也支持了上述期次的划分: ① 从具有先后切割关系的共轭节理确定的主应力方位, 可知近南北向的挤压早于 NE—SW 向的挤压; ② 同一断面上两组擦痕的先后关系表明, 早期主压应力方向近 S—N 向, 晚期挤压应力方向为 NE50°—SW230°; ③ 据显微构造的先后关系分析, 近 S—N 向挤压形成的方解石扭折带和微剪切带形成在先, NE—SW 向挤压形成的压溶缝合线形成在后; ④ 不同期次方解石脉中 e 双晶估算的差异应力, 反映早期构造应力场的差异应力是 200MPa 左右, 晚期构造应力场的差异应力在 80~120MPa 之间, 与不同期次共轭节理的计算结果一致; ⑤ 根据仙女山断裂切割了白垩系红色砂岩及其挤压变形特征, 以及白垩系红盆地中共轭节理和红色砂岩的显微构造确定的主压应力都是 NE—SW 向, 基本上反映了区域上喜山期主要变形阶段的特征。因此, 将其称为喜山主期构造应力场, 而 S—N 向的挤压应力场属燕山主期构造应力场。

2.4 燕山主期和喜山主期实测点构造应力场的分布特征

综合野外实测资料, 编制出图 2。由图 2 可以看出燕山主期和喜山主期构造应力场的分布特征。燕山主期: 最大主应力 σ_1 近水平, 一般倾角 $< 25^\circ$, 总体方向近 S—N 向, 在区域上的变化范围是 NW340°~NE20°, 最小主应力 σ_3 近水平, σ_2 近直立; 差异应力在 200MPa 左右, 变化范围为 150~250MPa; 以天阳坪断裂(高家堰—白沙驿一带)为界, 南部差异应力(200~250MPa) 高于北部差异应力(150~200MPa), 在接济坪附近(狮子口地区)差异应力更低(100~150MPa)。喜山主期: 最大主应力 σ_1 近水平, 一般倾角 $< 30^\circ$, 总体方向为 NE70°—SW250° 左右, 变化范围为 NE50°~80°; 差异应力为 100MPa, 变化范围为 80~120MPa, 区域上的空间变化规律不太明显。

3 区域构造应力场的有限元模拟分析

严格地讲, 上述方法求得的构造应力资料只是区域上有限点的应力状态, 并不能上升到场的概念。下面采用有限元模拟实验分析来探讨区域应力场的空间分布特征和演化过程。

3.1 实验方法

考虑区内脆性变形特点和区域变形的影响, 选用弹性平面力学模型和平行四边形几何模型。实验的边界范围北以房山县—青峰断裂为界, 西至新华断裂, 南至清江, 东部与西界平行且包括远安断裂, 构成一个区域上的菱形块体。由于黄陵背斜在区域构造变形中的重要作用, 将其作为一种介质材料; 盖层岩石以石灰岩为主, 也近似地作为一种介质材料。据此划定的几何模型边界及内部单元如图 3 所示, 给定的边界条件是: 燕山主期应力场外施南北向主压应力的线性均布载荷, 量级为 250MPa; 喜山主期应力场外施 NE70°—SW250° 主压应力方向的线性均布载荷, 量级 120MPa, 经计算并与实测资料校对, 取得了比较可靠的结果。

1) 水电部长江流域规划办公室, 三峡勘测大队。长江三峡水利枢纽工程区域稳定性研究报告, 1985。

2) 水电部长江水利委员会勘测总队, 三峡勘测大队。长江三峡工程坝区及外围地壳稳定性研究, 1990。

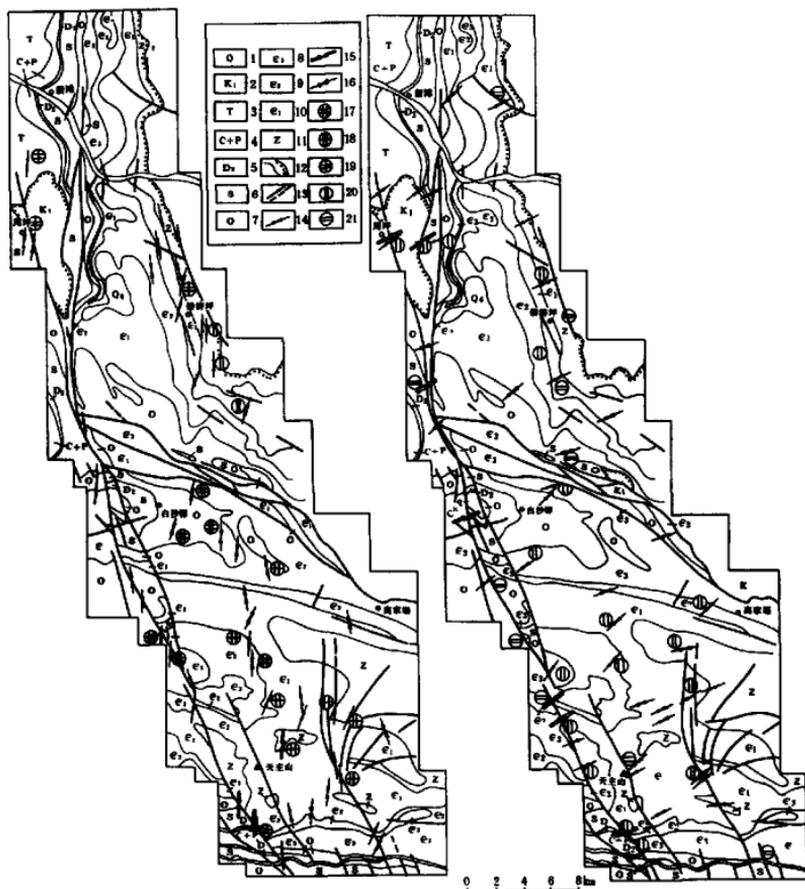


图2 实测构造应力分布图

Fig. 2 Distribution of measured tectonic stress

A. 燕山主期构造应力分布图; B. 喜山主期构造应力分布图。 1. 第四系; 2. 下白垩统; 3. 三叠系; 4. 石炭系一二叠系; 5. 中泥盆统; 6. 志留系; 7. 奥陶系; 8. 上寒武统; 9. 中寒武统; 10. 下寒武统; 11. 震旦系; 12. 地层界线及角度不整合; 13. 断层及推测断层; 14. 用共轭节理求出的主压力方位; 15. 用显微构造求出的主压应力方位; 16. 用断层擦痕求出的主压应力方位; 17. 差异应力 $>250\text{MPa}$; 18. 差异应力为 $200\sim 250\text{MPa}$; 19. 差异应力为 $150\sim 200\text{MPa}$; 20. 差异应力在 $100\sim 150\text{MPa}$; 21. 差异应力在 $50\sim 100\text{MPa}$ 。

A. Tectonic stress distribution of Yanshan movement; B. Tectonic stress distribution of Himalaya movement. 1-12. Stratigraphic unit and boundary; 13. fault; 14-16. direction of principal stress result from conjugate joint, microstructure, fault striae; 17-21. differential stresses, $>250\text{MPa}$; $200\sim 250\text{MPa}$, $150\sim 200\text{MPa}$, $100\sim 150\text{MPa}$, and $50\sim 100\text{MPa}$, respectively.

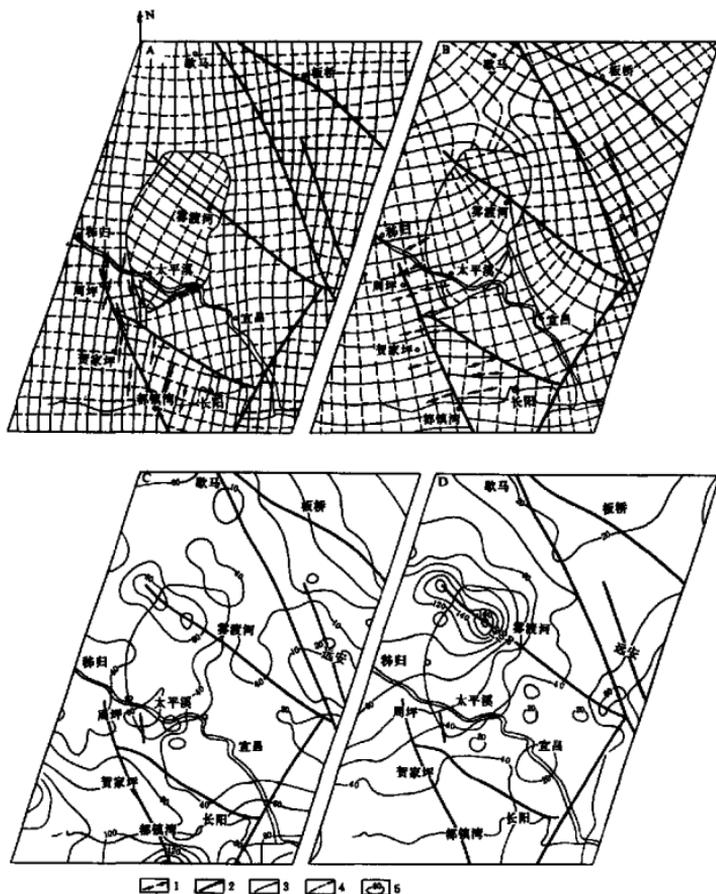


图3 区域构造应力场有限元模拟实验图

Fig. 3 The limited element analog diagram of regional tectonic stress field

A. 燕山主期构造应力场主应力轨迹分布图; B. 喜马拉雅主期主应力轨迹分布图; C. 燕山主期构造应力场最大剪应力相对等值线图; D. 喜马拉雅主期最大剪应力相对等值线图。

1. 实测主压应力; 2. 断层; 3. 最大主压应力轨迹线; 4. 最小主应力轨迹线; 5. 最大剪应力相对等值线

A. distribution of trajectory of the principal stress of Yanshan movement. B. distribution of trajectory of the principal stress of Himalaya movement. C. relative isogram of maximum shear stress of Yanshan movement tectonic stress field. D. relative isogram of maximum shear stress of Himalaya movement tectonic stress field

1. measured principal compressive stress; 2. fault 3. trajectory of the minimum principal compressive stress; 4. trajectory of the minimum principal stress; 5. relative isogram of the maximum shear stress.

3.2 结果分析

为了与实测主压应力方向和差异应力值对比,这里选用各期构造应力场的主应力轨迹线图 and 最大剪应力相对等值线图(图3)。由燕山主期构造应力场主应力轨迹分布(图3A)可以看出,实测主压应力方向与有限元计算结果对应较好,在周坪、贺家坪和清江附近几乎完全一致,在接济坪和白沙驿偏差角 $<10^\circ$;从燕山主期最大剪应力相对等值线分布图(图3C)分析,其最大剪应力分布变化趋势与地质测量的结果相似,如最大剪应力值从清江到长江总趋势是逐渐降低,以天阳坪断裂为界南高北低。

从喜山主期构造应力场主应力轨迹分布图(图3B)可以看出,实测主压应力方向与有限元计算的主应力方向对应较好,在接济坪、周坪、贺家坪和都镇等地几乎一致,而在天阳坪与仙女山断裂之间两者略有偏差,偏差角 $<20^\circ$ 。从喜山主期最大剪应力相对等值线分布图(图3D)可以看出,最大剪应力分布变化趋势与实测结果相似。

综上所述,有限元计算结果与实测结果虽有一定差异,但总的应力分布和变化趋势是一致的,因此,可以把实测点的应力状态上升到各点应力连续分布的区域应力场。

4 狮子口重力滑动构造系统的构造应力场

4.1 构造应力场特征

狮子口重力滑动构造系统是在区域构造应力场的背景下,由特定的构造环境导致的局部构造应力场的产物。该构造系统由多个滑块组成,因此构造应力场比较复杂。对各滑块内发育的小构造进行统计,可以确定其主应力状态,在此基础上,沿横切重力滑动构造系统的剖面编制出各滑块的主应力轴图解(图4)。由图4可以看出:①各滑块后缘的 σ_3 呈SW向缓倾, σ_1 近直立至中等倾斜;后缘的 σ_1 呈SW向缓倾, σ_3 近直立至中等倾斜,反映了滑动系统后缘拉伸、前缘挤压的构造应力场。②各滑块的拉伸与收缩区交替出现,据其主应力状态可将整个滑动系统三分,这与叠置产出的三个滑块完全一致。③这种后缘拉伸、前缘挤压的构造应力场,在剖面上局限于各滑块的滑面之间,在平面上与各滑块的空间展布一致,与前述区域构造应力场显著不协调。

4.2 构造应力场形成条件分析

狮子口重力滑动构造系统构造应力场的形成和发展主要受两个因素的影响,其一是燕山主期区域构造应力场的影响,在近S-N向的挤压体制下,先存的黄陵背斜核部的岩体充当了一个巨型“压力影”构造,南、北两侧承受挤压并形成了轴面和断面外倾的褶皱和断裂,而东、西两侧的应力屏蔽作用产生了近东西向的拉伸;其二是重力滑动作用的发生,在黄陵背斜东西两侧拉伸作用的疏导下,沉积盖层发生了自上而下、由东向西的重力滑动,从而导致了狮子口地区自成体系的构造应力场的出现,其空间分布局限于重力滑动构造的展布范围,在剖面上主要见于滑面以上的滑块内部,表现出重力滑动构造应力场的局限性和独立性,因而属于局部构造应力场,除应力大小、方向与区域构造应力场不同外,在动力来源、作用方式和变形机制等方面也存在本质的区别。

5 结语

燕山运动主期的近S-N向挤压是狮子口重力滑动构造系统形成的背景应力场。近S-N向的挤压必然引发近E-W向的拉伸,在这一过程中,先存的黄陵岩体起到了关键作用,首先

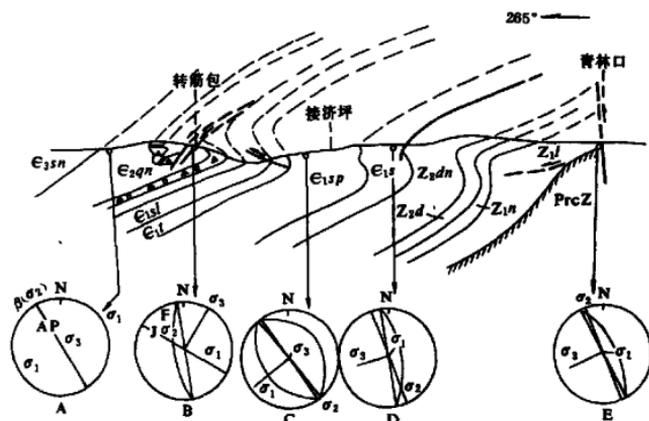


图4 重力滑动构造主应力轴图解

Fig. 4 The principal stress axes diagram of gravity sliding structure

A. 外缘带直立水平褶皱; AP: 轴面; β : 枢纽; σ_1 : $60^\circ \angle 0^\circ$; σ_2 : $330^\circ \angle 0^\circ$; σ_3 : 直立。

B. 正断层(F)及其伴生张节理(J); σ_1 : $120^\circ \angle 28^\circ$; σ_2 : $300^\circ \angle 61^\circ$; σ_3 : $30^\circ \angle 0^\circ$ 。

C. 共轭节理; σ_1 : $232^\circ \angle 4^\circ$; σ_2 : $141^\circ \angle 2^\circ$; σ_3 : $30^\circ \angle 84^\circ$ 。

D. 共轭节理; σ_1 : $33^\circ \angle 66^\circ$; σ_2 : $160^\circ \angle 16^\circ$; σ_3 : $253^\circ \angle 19^\circ$ 。

E. 共轭节理; σ_1 : $93^\circ \angle 73^\circ$; σ_2 : $338^\circ \angle 8^\circ$; σ_3 : $245^\circ \angle 15^\circ$ 。

A. vertical fold in front of zone; AP > axial-plane; β : hinge; σ_1 : $60^\circ \angle 0^\circ$; σ_2 : $330^\circ \angle 0^\circ$; σ_3 : vertical

B. normal fault (F) and associated tension joint, σ_1 : $120^\circ \angle 28^\circ$; σ_2 : $300^\circ \angle 61^\circ$; σ_3 : $30^\circ \angle 0^\circ$ 。

C. conjugate joint, σ_1 : $232^\circ \angle 4^\circ$; σ_2 : $141^\circ \angle 2^\circ$; σ_3 : $30^\circ \angle 84^\circ$ 。

D. conjugate joint. σ_1 : $33^\circ \angle 66^\circ$; σ_2 : $160^\circ \angle 16^\circ$; σ_3 : $253^\circ \angle 19^\circ$ 。

E. conjugate joint, σ_1 : $93^\circ \angle 73^\circ$; σ_2 : $338^\circ \angle 8^\circ$; σ_3 : $245^\circ \angle 15^\circ$ 。

是承受了近南北向的挤压,起到了屏障作用;其次是在其东西两侧形成了两个南北向挤压应力的屏蔽区,导致了近 E-W 向的拉伸。在此背景下,狮子口地区重力滑动一旦发生,就会形成自成体系的局部应力场,其应力分布状态取决于滑动系统各滑块的滑移方向、速率和滑移量的差异,它们呈现的前缘挤压、后缘拉伸并交替出现的应力状态造成了局部构造应力场及其构造形迹的复杂化,与区域构造显著不协调。喜山主期的 NE-SW 向挤压的构造应力场减弱并最终导致了狮子口地区近东西向的重力滑动作用的结束。

衷心感谢长江水利委员会陈德基国家勘察大师和扬天明、袁登维、吴玉华等高工的支持以及索书田教授的热情帮助。

参 考 文 献

- 1 李兴唐等. 长江三峡狮子口地区断层最新活动年龄及工程评价. 地震地质, 1988.
- 2 宋利好等. 长江三峡狮子口地区重力滑动构造研究. 长春地质学院学报, 1995(2).
- 3 王维襄等. 棋盘格式构造的力学分析. 见《地质力学论丛》(第4号). 北京: 科学出版社, 1977.
- 4 高士钧等. 长江三峡地区地壳应力场与地震. 北京: 地震出版社, 1992.

STRESS FIELD OF THE EASTERN AREA OF THE YANGTZE GORGE RESERVOIR AND THE SHIZIKOU GRAVITATIONAL GLIDING SYSTEM

Song Lihao, Yang Sennan, Wu shuren; Ren Jianye
(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract: Systematic study on the regional stress field in the eastern area of the Yangtze Gorge Reservoir and the local stress for the Shizikou gravitational gliding system has been carried out by stereographic and statistical analyses on numerous conjugate joints, slickensides, stylonites and microstructures including fractures with their veinlets, pressure solution seams and tectonic lenses. The regional principal compressive stress (σ_1) is determined to be horizontal with two stress groups directed S-N and NEE 75°-SWW250° respectively. Based upon quantitative analysis on regional paleostress field by rock rupture criterion combined with e-twin ratio and dislocation density methods, the differential stress during S-N compressive deformation is estimated at 200MPa, whereas that during NEE 75°-SWW250° compression at 80-120MPa. The cross-cutting relationships between conjugate joints, fault striae, microstructures and regional faults and folds indicate that the S-N- and NEE 75°-SWW250°-oriented compressions were active during the main stages of the Yanshanian and the Himalayan movements respectively. It is shown by finite-element simulation that the Yanshanian differential stress in the southern area has higher strength than that in the northern section. In contrast, no significant spacial variations in differential stress have been found for the Himalayan compression. Stereographic and statistical analyses on minor structures inside the Shizikou gravitational gliding system reveal that the stress field of that system is generally characterized by front-edge compression and back-edge extension with gently dipping σ_2 towards NE-SW and moderately dipping to nearly vertical σ_1 at the back edge, and gently dipping σ_1 towards NE-SW and moderately dipping to nearly vertical σ_2 at the front edge. The stress field of the Shizikou gravitational gliding system is defined to be the local one superimposed on the regional field yielded by the main stage of the Yanshanian movement.

Key words: stress field, gravitational gliding system, Huangling anticline, Yangtze Gorge.