

地质灾害国际交流论文集

铁道部第二勘测设计院

蒋忠信 陈国亮 编

西南交通大学出版社

铁道部第二勘测设计院

地质灾害国际交流论文集

蒋忠信 陈国亮 编

西南交通大学出版社

(川)新登字 018 号

地质灾害国际交流论文集

蒋忠信 陈国亮 编

*

西南交通大学出版社出版发行

(成都 九里堤)

西南交通大学出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 10.25

字数: 190 千字 印数: 1—1000 册

1993 年 6 月第 1 版 1993 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 7—81022—569—3/P·008

定价: 7.80 元

3

内 容 简 介

铁道部第二勘测设计院在山区地质灾害的研究与防治方面，积累了 30 多年的宝贵经验。本文集编辑了近几年来该院在国内外地质灾害国际学术会议上交流的论文 27 篇，涉及崩塌与滑坡、泥石流与洪水、岩溶与隧道涌水、特殊岩土等各个方面的论述。

本文集题材广泛，内容丰富，包括地质灾害的分布规律、形成机制、预测模型和防治模式等理论研究成果；灾害地质体空间形态、运动位移、临界状态和力学参数的分析计算方法；离心加载、计算机模型、多时相遥感等试验判释手段；各种地质灾害的典型实例，灾害预防、工程整治和铁路选线的众多成功经验总结。本文集可供从事地质灾害研究、国土规划整治、交通农水建设和防治工程勘察设计的科学研究人员、工程技术人员、高等院校师生和政府工作人员参考。

序

人类正面临着自然灾害的严重威胁和挑战。据估计：世界各类灾害，平均每年造成的经济损失高达 850 亿至 1200 亿美元。80 年代死亡人数已超过 100 万人。我国是世界上有史以来受灾最多、最深的国家之一，所以，减灾防灾意义重大。

我国地域辽阔，地质灾害繁多。尤其是西南地区，受其特殊的气候、水文、地形、地貌、构造、岩性等因素的综合影响，使之成为我国滑坡、崩塌、泥石流、岩溶塌陷等分布最集中、发生频率最高的地区之一，且具有多发性和突发性的特点，经常给城乡人民的生命财产带来严重损失。因此，必须加强地质灾害的研究，探索其形成机理、规律，揭示其演变趋势，预测其发生的时间、空间和强度，从而为减灾、防灾、抗灾提出科学的对策。

我院地处西南，在四十多年的铁路勘测设计中，地质灾害工点比比皆是，仅就所遇滑坡即达 650 余处。至今，诸如宝成、成昆、贵昆、川黔等线，每当雨季，崩塌、泥石流仍防不胜防，古滑坡甚至成群复活，新滑坡往往频繁发生，岩溶地面时而突然塌陷……。因此，我院从事研究地质灾害的历史较长，人员较多，其中不乏成就突出者。他们观察敏锐，思路新颖，或独有见地，丛绿点红；或独辟蹊径，自成体系。形成了我院专家队伍中异彩纷呈的璀璨明星。

蒋忠信同志，将灰色系统理论应用于地质灾害的研究有年。他善于用数学分析法抽象概括，在中外刊物发表论文已达三十余篇，其学术成果很为同行赞许，有人称之为，在地质灾害研究领域，别开生面，独树一帜，因而荣获中青年科技专家的称誉。

陈国亮同志，对岩溶灾害及防治的研究，已二十余年。他善于探索，敢于创新，获得了一系列成果。在理论上著述颇多，自成体系；在实践中已推广应用。如岩溶塌陷成因机理及预测方法、岩溶洞穴顶板安全厚度等研究成果，分别获得铁道部科技进步二等奖和三等奖。

在作者之中，有我院老一代的专家，又有年轻的后起之秀，兹不一一冗赘。

现将他们近年来参与国际性学术活动中的部分论述，编撰成册，以飨读者。如有未尽善之处，惠望指正。

铁道部第二勘测设计院
科学技术研究所 所长 唐敬华

一九九二年元月二十日

目 录

崩 塌 与 滑 坡

长江三峡链子崖危岩北区位移特征	蒋忠信	1
长江三峡链子崖危岩体变形机理的离心模型试验	李龙林 李聚金	11
山体危岩稳定性分析	张本才 高夕良 曾 平	18
云南滑坡分布的坡向性分析	蒋忠信	23
滑坡床形态的定量描述	蒋忠信	28
滇东北苏家坪滑坡的初步研究	顾 聪	35
遥感技术在山地自然灾害监测中的应用效果	王宇丰	41

泥 石 流 与 洪 水

泥石流集中分布河段沿河铁路环境评价及泥石流防治模式	陈光曦	43
泥石流沟谷纵剖面形态与流域地貌信息熵	蒋忠信	49
泥石流流域系统的超熵	蒋忠信	58
成昆铁路隐性(潜在)泥石流	李永健	67
泥石流防治工程设计中的若干问题	张赫文 余冠群	73
瓦洪沟泥石流整治工程设计	余冠群	78
应用多时相遥感图像判释列古洛多沟泥石流形成及发展	王宇丰	81
铁道工程的不良水文效应——人为水害	丁玉寿 赖荫培	84

岩 溶 与 隧 道 涌 水

岩溶化基准面的模式	陈国亮	88
岩溶洞穴顶板安全厚度研究	陈国亮	94
岩溶地区铁路位置选择原则	陈国亮	100
隧道中岩溶危害的特殊处理	陈国亮 王克家	106
岩溶地面塌陷机制、预测及整治研究	陈国亮 陈裕昌 谭鸿增 张江华 李乃非	111
覆盖型岩溶地区地面塌陷对铁路环境地质的挑战	陈国亮	119
水均衡法预测岩溶区坑道涌水量的见解	张江华 陈国亮	125
大巴山隧道施工中的突发性涌水及其施工处理	张社道	130

特 殊 岩 土

中国成都平原膨胀土的工程特性·····	廖世文	134
侧向膨胀压力的一种近似计算方法·····	蒋忠信 秦小林	137
滇池地区泥炭质土工程地质特性研究·····	蒋忠信 黄俊	143
采煤沉降有关问题的初步研究·····	陈国亮	153

崩塌与滑坡

长江三峡链子崖危岩北区位移特征

科学技术研究所 蒋忠信

链子崖危岩位于湖北省秭归县长江南岸，扼兵书宝剑峡出口，与新滩滑坡隔江相峙。危岩体南北长700余米，东西宽50~180 m，北宽南窄，面积约0.54 km²，体积约340万立方米。危岩东、北面陡崖高65~105 m，呈近于与长江平行的弧形。危岩体由栖霞灰岩构成，夹17层炭质页岩；崖脚为马鞍山煤系，最厚4.2 m。崖体顶面基本顺岩层层面发育，北区岩层产状为NE42°/29°NW。小断层走向为北偏东与北偏西，节理走向NWW、SN、NW。因陡岸卸荷、崖底采煤及页岩软化，危岩体中30多条追踪节理、断层可分成14组和T_{1.3}—T₈、T₇、T₈—T_{1.2}三个裂缝区。裂缝最长达170 m，最深已切割至煤层，其中T₈—T_{1.2}为危岩北区。自1958年观测表明，裂缝继续发展，危岩不断位移。

自1964年以来，国内众多单位对链子崖危岩进行了调查研究，我院承担了危岩整治的方案设计工作，通过位移观测资料的统计分析，阐明危岩北区各岩块位移变形的运动形式、方向和速率，为方案设计提供了必要的参数。

一、位移观测数据

危岩北区面积约2.5万平方米，体积约250万立方米。由于危岩体积巨大、裂隙众多（表1）、陡崖直逼长江，因而对长江航道的威胁最为直接，是整治的重点。

表1 链子崖危岩北区主要裂缝特征⁽¹⁾

裂缝组号	裂缝条数	主缝产状	主缝规模 (m)			力学性质	下切岩层
			长	宽	深		
T ₈	7	NW60~70°/60~90°NE	160	0.15~2	90	追踪拉张	切至陡壁中之软弱夹层
T ₉	1	NW70~90°/70~90°SW	170	0.13~2.5	80	剪切拉张	切至陡壁中之软弱夹层
T _{1.0}	7	NW70~80°/65~80°SW	65	0.01~0.3	30	拉 张	切至陡壁中之软弱夹层
T _{1.1}	3	NW80°/80°NE	70	0.12~0.3	50	拉 张	切至陡壁中之软弱夹层
T _{1.2}	1	NW10~NE15°/60~80°NE、SW	30	0.04~0.5	105	剪切拉张	切至煤系地层
T _{1.3}	1	NE85°/80~85°NE		0.5~0.9	约100	拉 张	切至陡壁中之软弱夹层

湖北省滑坡岩崩研究所在危岩北区设置了6个位移观测点，进行平面位移和垂直位移的系统观测，积累了1978—1987年共10年的观测资料（表2，图1）。

表 2 北 区 岩 体 三 向 位 移 坐 标 值 (mm)⁽¹⁾

测点及其位置	坐标	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
I _上 (T ₈₋₁₋₂ 以南陡崖上)	X	-1.43	-1.02	0.58	1.70	4.70	3.36	5.81	5.52	10.32	10.31
	Y	-2.72	-3.23	-2.68	-4.07	-4.27	-4.84	-3.04	-3.07	-1.08	-1.59
	Z	-0.27	-0.97	-1.24	-1.30	-0.77	-0.41	-0.17	-0.91	-1.30	-0.60
T ₈ (T ₈₋₂₋₁ 至T ₈₋₂₋₂ 间崖上)	X	0.65	2.51	4.73	6.46	8.59	8.94	11.70	12.14	15.40	17.81
	Y	-2.34	-2.65	-2.43	-2.93	-2.64	-3.67	-1.77	-1.56	-0.50	-1.78
	Z	-0.67	-2.55	-4.62	-4.65	-4.45	-4.79	-5.62	-6.76	-8.60	-12.10
B _上 (T ₉ 至T ₁₀ 间崖上)	X	0.96	4.15	7.06	9.24	11.29	12.32	15.24	15.57	19.30	21.08
	Y	-3.19	-4.79	-6.59	-7.21	-7.64	-9.78	-8.32	-8.08	-7.18	-8.94
	Z	0.59	-0.08	-0.84	-1.70	-2.17	-2.81	-3.29	-3.91	-4.30	-4.20
F _上 (T ₁₀ 陡崖上)	X	0.96	3.29	5.83	7.54	9.14	9.83	11.95	12.19	15.22	16.91
	Y	-3.63	-5.67	-7.73	-9.69	-9.77	-11.51	-11.30	-10.76	-9.22	-10.51
	Z	-0.74	-2.96	-4.89	-6.28	-6.98	-7.78	-8.54	-9.13	-10.00	-10.20
G _上 (T ₁₁ 至T ₁₂ 间崖上)	X	6.96	17.52	23.40	26.69	30.31	31.05	33.75	34.73	38.04	38.92
	Y	-7.68	-20.50	-24.77	-27.97	-30.48	-32.47	-32.95	-33.68	-32.38	-34.12
	Z	-7.20	-16.24	-18.12	-20.84	-22.92	-24.47	-26.04	-27.20	-28.30	-29.10
F _下 (T ₁₀ 至T ₁₁ 陡崖下)	X	0.98	2.69	6.26	6.35	6.93	8.76	10.49	12.32	13.12	
	Y	-2.92	-4.44	-5.22	-7.07	-9.81	-10.51	-10.38	-10.11	-12.06	

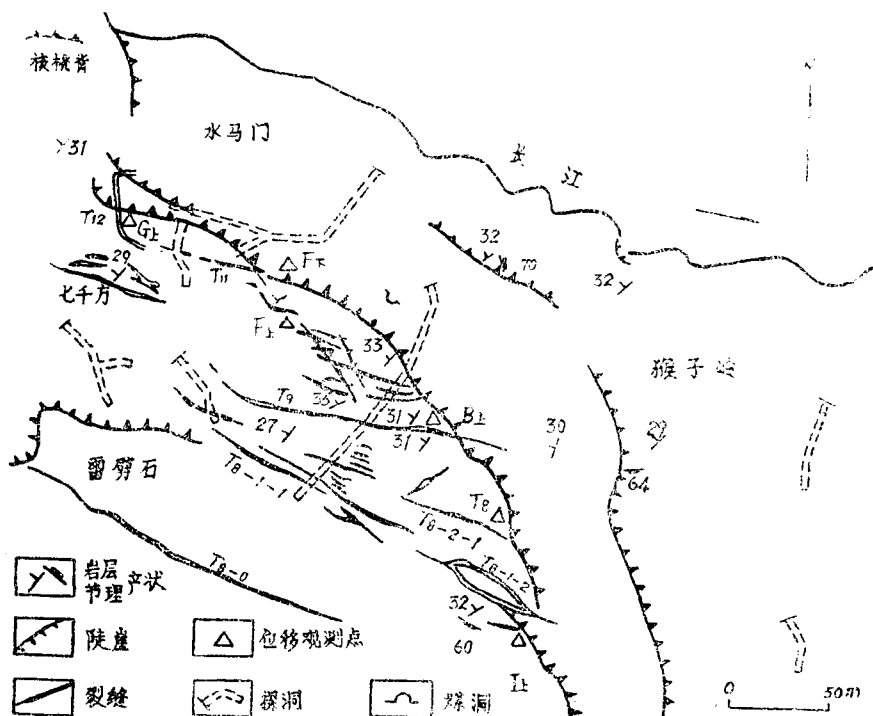


图 1 链子崖危岩北区工程地质略图

表 2 中 X 、 Y 为假定平面坐标。 X 轴正向为 $NE\ 30^\circ$ ， Y 轴负向为 $NW\ 60^\circ$ ， Z 为垂直坐标。据此，计算出各观测点的以下 5 种位移参数，作为统计分析的基础数据：

- (1) 年平面位移值 l : $l = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$;
- (2) 年平面位移方位角 α : $\alpha = \text{tg}^{-1}(\Delta Y / \Delta X)$ ，以与 X 轴夹角计，顺时针为正；
- (3) 年垂直位移值 ΔZ ，向下为正；
- (4) 年空间位移值 L : $L = \sqrt{l^2 + \Delta Z^2}$;
- (5) 年位移垂直角 β : $\beta = \text{tg}^{-1}(l / \Delta Z)$ 。

式中， ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 为每一年度沿坐标方向的位移值， l 、 L 、 ΔZ 以 mm 计， α 、 β 以度计。

二、岩块间位移参数的相关分析

各测点位于不同岩块上，测点间位移参数的相关性可从一个侧面反映岩块间的联系性。各测点对应位移参数间的直线回归结果汇总于表 3。

表 3 各测点位移参数间相关分析结果

测 点	位移参数的相关系数 r					样点数 n
	l	α	ΔZ	L	β	
$F_{\text{上}}$ 与 $G_{\text{上}}$	0.619	0.626	0.548	0.703*	0.385	10
$B_{\text{上}}$ 与 $F_{\text{上}}$	0.888**	0.918**	0.526	0.882**	0.842**	10
T_8 与 $B_{\text{上}}$	0.717*	0.903**	0.567	0.228	0.387	10
$I_{\text{上}}$ 与 T_8	0.675*	0.426	0.049	0.339	0.281	10
$F_{\text{下}}$ 与 $F_{\text{上}}$	0.460	0.363				9

注 *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关。

表 3 显示, $F_{\perp}$ 与 $B_{\perp}$ 两点的各位移参数皆密切相关, 相关系数平均值 $\bar{r} = 0.811$, 表明裂缝 T_9 至 T_{11} 的岩块整体性强, 可视为一个统一岩块。点 $G_{\perp}$ 与 $F_{\perp}$ 、 $B_{\perp}$ 与 T_8 位移参数有一定相关性, $\bar{r}$ 分别为 0.576 与 0.560, 表明 $G_{\perp}$ 、 $F_{\perp}$ 、 $B_{\perp}$ 、 T_8 处于不同岩块上, T_{8-1} — T_{12} 岩体被缝 T_9 、 T_{11} 分割成 T_8 — T_9 、 T_9 — T_{11} 、 T_{11} — T_{12} 三个岩块, 但因位移有统一诱因而又相互有牵连。点 $I_{\perp}$ 与 T_8 的位移参数相关性差, $\bar{r} = 0.354$, 指示 T_{8-1} 缝是危岩体的一条重要界线, 危岩体周界为 T_{8-1} — T_{12} , T_{8-1} 以南岩体绝对位移值很小, 不属于危岩范围。 $F_{\perp}$ 与 $F_{\top}$ 两点间位移参数相关性也不密切, $\bar{r} = 0.412$, 表明 T_{10} 缝附近的陡崖上、下的位移并不完全同步, 变形方向、速率尚有差异。

10 年期间, 各测点最终位移值以点 $G_{\perp}$ 最大, $F_{\perp}$ 、 $B_{\perp}$ 、 T_8 次之, $I_{\perp}$ 最小 (表 4), 说明 T_{11} — T_{12} 岩块最不稳定, T_8 — T_9 、 T_9 — T_{11} 两岩块较不稳定, T_{8-1} 以南属稳定区。

表 4 10 年间各测点最终位移值 (mm)

参 数	$G_{\perp}$	$F_{\perp}$	$F_{\top}$	$B_{\perp}$	T_8	$I_{\perp}$
l	51.76	19.91	17.82	22.90	17.9	10.43
ΔZ	29.10	10.20	—	4.20	12.10	0.63
L	59.38	22.37	—	23.28	21.61	10.45

三、各位移参数之间的相关分析

为探讨每个测点所在岩块的变形特点, 对同一测点的平面位移值 l 与方位角 α 、垂直位移值 ΔZ 与位移角 β 、平面方位角 α 与垂直位移角 β 进行直线回归, 其结果所显示的规律如表 5 所示。

表 5 各位移参数间直线回归之结果

相关参数	直 线 相 关 系 数 r					样 点 数
	$G_{\perp}$	$F_{\perp}$	$B_{\perp}$	T_8	$F_{\top}$	
β 与 α	-0.390	0.620	0.608	0.207	—	10 ($F_{\perp}$ 为 8)
l 与 α	-0.161	-0.542	-0.297	0.300	-0.164	10 ($F_{\perp}$ 为 9)
ΔZ 与 β	0.174	0.510	0.611	0.745*	—	10

1. β 与 α 的相关性

点 $G_{\perp}$ 的 β 与 α 为负相关, 其余各点为正相关。本区岩层倾向 NW 48° , 即 α 为 -78° , α 增大反映测点由岩层倾向方位右旋移动, 岩层视倾角逐渐减小, 点 $G_{\perp}$ 的垂直位移角 β 随 α 增大而减小, 与岩层视倾角随 α 增大而减小的变化同步, 显示 $G_{\perp}$ 所在岩块有顺岩层层面滑移之迹象。 $F_{\perp}$ 、 $B_{\perp}$ 、 T_8 三点, β 随 α 增大而增大, 即位移方位愈近于与陡崖垂直, 位移垂直角 β 愈大, 反映了向下坐落之性质。

2. ΔZ 与 β 的相关性

除点 $G_{\perp}$ 外, 各测点的 ΔZ 与 β 呈较明显的正相关关系, 且部分 β 值已大于岩层倾角, 故非顺层滑移所致。

3. l 与 α 的相关性

各测点 l 与 α 的相关性均较差, 表明各岩块尚未完全被裂缝切割贯通而成为自由块体, 而是与周边尚有一定牵连。因为, 如系自由块体坐落, α 愈大即愈近于陡崖垂直时, 位移量 l 应相应增大, 即 l 与 α 要呈现良好的正相关。如系顺岩层面自由滑移, α 愈大即愈偏离岩层倾向时则位移量 l 应相应减小, 即 l 与 α 呈现良好负相关。只有岩块不能完全自由位移, l 与 α 的关系才不密切。

可见, 点 $G_{\perp}$ 所在的 $T_{11}-T_{12}$ 岩块具顺层滑移之特征, 其余三点所在的 T_9-T_{11} 、 T_8-T_9 岩块有向陡崖坐倾之迹象, 唯这些岩块尚未被裂缝、软弱夹层完全切割成自由块体。

四、位移方向的统计分析

1. 总位移方向分析

10 年期间, 各测点总的位移方向如表 6 所示。点 $G_{\perp}$ 的总平面位移方位为 $NW 11.24^{\circ}$, 与 T_{12} 缝贯穿陡崖段的走向 $NW 7^{\circ}$ 相近; 总垂直位移角为 26.11° , 与岩层顺 $NW 11.24^{\circ}$ 方向的视倾角 23.95° 相近。说明 $G_{\perp}$ 所在的 $T_{11}-T_{12}$ 岩块似沿 T_{12} 缝和顺岩层面剪出滑移。

表 6 10 年间各测点总的位移方向

测点 位移角	$G_{\perp}$	$F_{\perp}$	$F_{\perp}$	$B_{\perp}$	T_8	$I_{\perp}$
平面位移方位 α	-41.24	-31.86	-42.59	-22.98	-5.71	-8.77
位移垂直角 β	26.11	24.51	—	10.23	29.24	3.29

点 $F_{\perp}$ 、 $B_{\perp}$ 、 T_8 平面位移总方位角分别为 $NW 2^{\circ}$ 、 $NE 7^{\circ}$ 、 $NE 24^{\circ}$, 与测点南侧的 T_9 、 T_{8-1} 缝的走向 $NW 83^{\circ}$ 、 $NW 63^{\circ}$ 近于正交, 反映这些裂缝具垂直拉张的性质。三测点所邻陡崖段的走向分别为 $NW 64^{\circ}$ 、 $NW 30^{\circ}$ 与 $NW 20^{\circ}$, 因而三测点所在的 T_9-T_{11} 、 T_8-T_9 岩块基本循陡崖倾向 ($NE 26^{\circ}$ 、 $NE 60^{\circ}$ 、 $NE 70^{\circ}$) 与岩层倾向 ($NW 48^{\circ}$) 的二分角方向 ($NW 11^{\circ}$ 、 $NE 6^{\circ}$ 、 $NE 11^{\circ}$) 移动, 这既反映了地层产状与结构的影响, 又显示了陡崖卸荷、开采煤层的后果。三测点垂直位移角, 较沿平面位移总方位的岩层视倾角 (21.01° 、 17.64° 、 9.72°) 差异大, 反映 T_9-T_{11} 、 T_8-T_9 岩块顺层滑移的成分不大。

2. 平面位移方向趋势分析

图 2 显示, 各测点 10 年来平面位移的总趋势是顺时针右转, 仅近年有所反转。位移右旋系稳定岩体“核桃背”的阻抗和陡崖岩体的重力、卸荷作用所致。

选用多种简单曲线函数拟合平面位移曲线, 其结果如表 7 所示。假定 1987 年以后三年的位移量与 1985—1987 年三年相当, 则外延拟合曲线推测得出各测点 1988—1990 年三年平面位移总方位角为: $G_{\perp}$ $NE 5^{\circ}$ 、 $F_{\perp}$ $NE 15.21^{\circ}$ 、 $B_{\perp}$ $NE 22.39^{\circ}$ 、 T_8 $NE 36.52^{\circ}$ 。

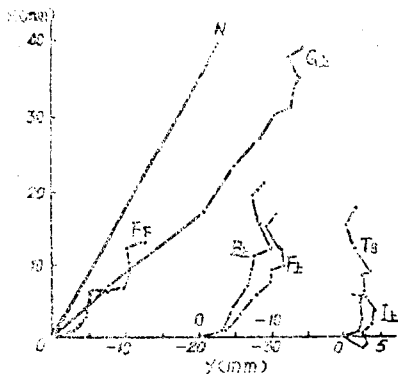


图 2 各测点逐年平面位移曲线

表 7 各测点平面位移曲线拟合结果

测点	曲线方程	曲线性质	相关系数
G ₁	$Y = 23.44 - 15.76 \lg X$	对数曲线	0.990**
F ₁	$Y = -3.819 X^{0.4027}$	抛物线	0.946**
B ₁	$Y = -3.281 X^{0.3363}$	抛物线	0.937**
T ₈	$Y = -3.392 - 0.0591 X$	指数曲线	-0.589

3. 垂直位移趋势分析

以逐年平面位移值 l 为横坐标, 垂直位移值 ΔZ 为纵坐标, 点绘垂直位移曲线如图 3。

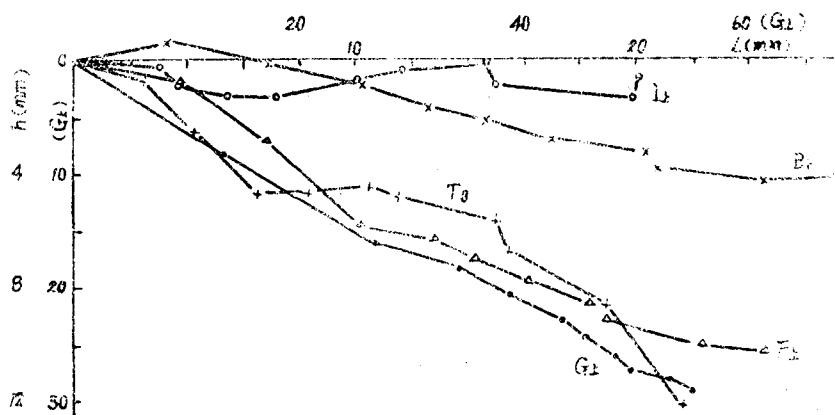


图 3 各测点垂直位移曲线

除位于危岩区范围外的 I₁ 点垂直位移上下波动外, 危岩区内各测点垂直位移均呈直线下降趋势。其中, 点 G₁ 直线相关最佳, 相关系数达 0.997, 直线斜率 26.33° 与 10 年间总垂直位移角 26.11° 一致。据此推测 T₁₁—T₁₂ 岩块未来滑移垂直角约为 26.5°。

T₉—T₁₁ 岩块之 F₁、B₁ 二点, $\Delta Z-l$ 曲线近期反翘, 岩块坐落角有减小趋势; T₈—T₁₀ 岩块之 T₈ 点, $\Delta Z-l$ 曲线近期下掉。这些反映出两岩块坐落, 并有内倾或外斜特点。

五、年位移量的统计预测

1. 年平面位移值 l 的统计预测

以 G₁ 点为例, 以 1978 年为第一年, 用简单曲线拟合 l 值变化曲线, 结果以双曲线为佳 (图 4)。曲线方程为:

$$l = 16.69 E^{-0.934}$$

式中, E 为年度, 相关系数 $r = 0.854^{**}$ 。双曲线位于第一象限, l 随时间递减。

得 $l^{(1)}(E) = -43.687 e^{-0.3884(E-1)} + 54.011$

为提高预测精度, 再进行单段函数的残差识别, 对残差 $\Delta^{(1)}$ 建立 DM(1, 1) 模型, 计算结果为:

$$\Delta^{(1)}(E) = 1.771 e^{-0.1817(E-1)} - 1.771$$

将残差函数加在原有模型的响应函数之上, 得系统模型为:

$$l^{(1)}(E) = 52.240 - 43.687 e^{-0.3884(E-1)} + 1.771 e^{-0.1817(E-1)}$$

这是一个递减的指数函数模型, $r = 0.930 (n = 9)$ 。

据上述三种较佳拟合式, 外推三年位移值如表 8 所示。预测值以双曲线式居中, 其相关系数也比二次抛物线大。灰色模型如考虑第一年的残差, 其相关性也比双曲线低。可见, 在突滑前的能量积聚与调整阶段, $T_{11} - T_{12}$ 岩块平面位移将变慢, 未来三年年位移量约 1.5~1.8 mm。

表 8 $G_{\perp}$ 点平面位移值的拟合式与外推值

l 值 拟 合 式	l 外 推 值 (mm)		
	1988 年	1989 年	1990 年
$l = 16.69 E^{-0.934}$	1.777	1.639	1.521
$l = 17.11 - 3.637 E + 0.2176 E^2$	3.429	4.796	6.599
$l^{(1)}(E) = 52.24 - 43.687 e^{-0.3884(E-1)} + 1.771 e^{-0.1817(E-1)}$	0.369	0.241	0.157

点 $B_{\perp}$ 、 T_s 的 l 值年际波动较大, 最低点在 1985 年, 以后两年又有回升, 10 年内总变化趋势不明显 (表 9), 故可用 10 年平均值 $\bar{l}$ 代表未来三年的 l 值。两点分别为 2.71、2.16 mm。

表 9 各测点 l 值曲线拟合式及预测值

测 点	拟 合 式	相关系数 r	样点数 n	预 测 值		
				1988 年	1989 年	1990 年
$B_{\perp}$	$l = 3.286 - 0.105 E$	-0.315	10	2.707	2.707	2.707
T_s	$l = 1.879 + 0.0507 E$	0.167	10	2.518	2.518	2.518
$F_{\perp}$	$l = 3.347 - 0.164 E$	-0.513	10	2.762	3.281	3.916
	$l = 1.839 + 0.0577(E-7)$	0.708				
$F_{\downarrow}$	$l = 3.106 - 0.147 E$	-0.605	9	1.485	1.337	1.190
	$l = 2.039 + 0.0310(E-7)$	0.584				

点 $F_{\perp}$ 、 $F_{\downarrow}$ 的 l 值在前 7~8 年呈明显下降趋势, 近 2~3 年回升, $F_{\perp}$ 用二次抛物线拟合较好, $F_{\downarrow}$ 用下降直线拟合为佳。三年外推值分别为 3.9~2.8 mm 与 1.5~1.2 mm。

2. 年垂直位移值 ΔZ 的统计预测

各测点 ΔZ 值变化曲线拟合结果如表 10 所示。点 $B_{\perp}$ 的 ΔZ 值较稳定, 拟合直线近于水平线, 可用 ΔZ 的平均值 $\overline{\Delta Z}$ 代表三年预测值, 即 $\overline{\Delta Z} = 0.420 \text{ mm}$ 。点 T_8 的 ΔZ 值年际变化甚大, 后七年上升趋势明显, 但整个十年间上升趋势不够明显, 故仍用 $\overline{\Delta Z}$ 预测未来三年, 即 $\overline{\Delta Z} = 1.210 \text{ mm}$ 。

表 10

各测点 ΔZ 年变化曲线拟合式与预测值

测 点	拟 合 式	相关系数 r	样点数	预 测 值 (mm)		
				1988 年	1989 年	1990 年
$G_{\perp}$	$\Delta Z = 9.433 E^{-0.9926}$	0.922**	10	0.873	0.801	0.740
$F_{\perp}$	$\Delta Z = 1.780 - 0.138 E$	0.663*	10	0.260	0.122	—
$B_{\perp}$	$\Delta Z = 0.394 + 0.0047 E$	0.032	10	0.42		
T_8	$\Delta Z = 0.427 + 0.142 E$	-0.337	10	1.21		

点 $F_{\perp}$ 的 ΔZ 值随时间呈较好的下降直线关系, 年下降率为 0.138 mm , 外推至 1990 年已反翘。点 $G_{\perp}$ 随年度呈密切的双曲线型下降关系, 外推三年的 ΔZ 值为 $0.87 \sim 0.74 \text{ mm}$ 。垂直位移值随时间而递减的趋势也反映了突变前能量积累与调整的过程。

六、结 束 语

1. 链子崖危岩以其规模巨大、威胁严重而中外闻名, 作为国家“七五”重点科技攻关项目, 经 20 多个单位的工作已取得不少研究成果。但这些成果多偏重于危岩地质条件、形成因素和宏观特征方面的研究, 真正为工程整治所急需的危岩体变形破坏方式、方向与速率等位移特征却研究尚少。本文以最直观反映危岩变形特点的位移资料分析入手, 统计并预测出各岩块变形破坏方式与参数。有关成果已被整治工程方案设计所采用, 结果是满意的。

2. 通过位移参数的统计分析, 对链子崖急待整治的危岩北区的变形规律得到以下认识:

(1) 北区危岩体可分割为 T_8-T_9 、 T_9-T_{11} 、 $T_{11}-T_{12}$ 三个岩块。 $T_{11}-T_{12}$ 岩块最不稳定, T_9-T_{11} 、 T_8-T_9 二岩块因尚有 $T_{11}-T_{12}$ 岩块的支撑而稳定性稍高。 T_{8-1} 以南不属于危岩区。

(2) 变形破坏方式: $T_{11}-T_{12}$ 岩块沿 T_{12} 缝顺岩层面剪出滑移的可能性较大; T_8-T_9 、 T_9-T_{11} 岩块在 $T_{11}-T_{12}$ 岩块未滑走之前下坐倾倒的可能性较大。但这些岩块尚未完全与周边脱离而成为自由块体。

(3) 各岩块平面位移方位有随时间向右偏转之趋势, 反映了“核桃背”阻抗和陡崖重力、卸荷作用, 以及逐块牵引拉裂的过程。

(4) 各岩块平面和垂直位移速率有随年度递减之趋势, 表明岩体处于突移前的能量积累和调整阶段。能量主要消耗于周边裂缝的撕张。这些裂缝完全贯通后才可能发生突移。

(5) 预测三岩块 1988—1990 年位移变形的特征值如表 11 所示, 有关数值可以作为工程设计的依据。

表 11

各岩块未来三年变形参数预测值

测 点	岩 块	未 来 三 年 预 测 值			
		平面位移方向	年平面位移值 (mm)	位移垂直角	年垂直位移值 (mm)
G _上	T ₁₁ —T ₁₂	NE5°	1.52~1.78	26.5°	0.74~0.87
F _上 、B _上	T ₉ —T ₁₁	NE15°E22°	2.73~3.41	变小	0.21~0.34
T ₈	T ₈ —T ₉	NE36.5°	2.16	加大	1.21

3. 本文的位移资料分析主要运用常规的相关分析、曲线拟合等方法。由于分析统计的位移参数选择恰当,与变形机制和地质条件联系密切,结果仍然是可信的。将分析结果与裂缝动态及空间展布规律、陡崖岩壁破碎变形情况、岩块稳定性检算结果等进行综合印证,是基本一致的。但因崖脚仅一个测点,岩块变形破坏方式、T₁₁—T₁₂岩块是顺煤层还是软弱页夹层面滑移等问题,尚需在补充观测资料后进一步论证。

4. 本文及整治方案研究设计完成后,得到1988—1989年的位移观测数据。现以1989年度的资料对本文变形参数预测值进行检验(表12)。结果表明,预测的位移方向、速率与实测值基本吻合,各测点间的差异趋势也与实测差异趋势相似。从位移参数看,年平面位移值*l*的预测精度最高,平均偏差率仅23.3%;年平面位移方位角 α 的预测精度也较高,平均偏差值为11.8°;年垂直位移值的预测精度尚可,G_上、F_上两点的偏差率仅分别为12.5%与16.7%。从测点看,G_上点预测精度最高,年平面和垂直位移值偏差率平均仅为10.5%,年平面和垂直位移角平均偏差值仅0.9°。F_上点预测精度较高,位移值平均偏差率为31.4%, α 偏差值为1.4°。B_上、T₈二点预测精度,除*l*值较高(平均偏差率19.3%)之外,对 α 、 ΔZ 值都较低。验证表明本文的分析、预测是基本可信的,可供整治工程设计之用。

表 12

位移参数预测值与1989年实测值之对比

测点	岩 块	<i>l</i> (mm)		α°		ΔZ (mm)		β°	
		预测值	实测值	预测值	实测值	预测值	实测值	预测值	实测值
G _上	T ₁₁ —T ₁₂	1.65	1.79	NE5°	NE3.4°	0.80	0.9	26.5	26.7
F _上	T ₉ —T ₁₁	3.28	1.77	NE15°	NE13.6°	0.12	0.1	—	3.2
B _上	T ₉ —T ₁₁	2.71	2.03	NE22°	NE9.8°	0.42	-0.6	—	-16.5
T ₈	T ₈ —T ₉	2.16	1.87	NE36.5°	NE4.5°	1.21	0.3	—	9.1

工作中承郭赞栋、张钧高级工程师协助,谨此致谢。

参 考 文 献

- 〔1〕 中国科学院地质研究所、湖北省滑坡岩崩研究所,《链子崖危岩体变形机理与防治方案的初步设想》,1988年
- 〔2〕 邓聚龙,《灰色系统》,国防工业出版社,1985年