



岩石边坡工程

长江三峡西陵峡链子崖危岩体稳定性研究

哈秋舫 张永兴 著

重庆大学出版社

岩石边坡工程

——长江三峡西陵峡链子崖危岩体稳定性研究

哈秋舫 张永兴 著

重庆大学出版社

2W63/12

岩石边坡工程
——长江三峡西陵峡链子崖危岩体稳定性研究

哈秋龄 张永兴 著
责任编辑 饶邦华 何光杰

*

重庆大学出版社出版发行
新华书店经销
四川外语学院印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:6.5 字数:162千
1995年6月第1版 1995年6月第1次印刷
印数:1—1300

ISBN 7-5624-1038-0 /P·16 定价:12.00元

(川)新登字 020 号

目 录

总论	1
0.1 研究背景	1
0.2 研究指导思想	3
0.3 链子崖危岩体防治工程研究工作要点	5
1 研究现状概述	7
1.1 危岩体主要工程地质条件概述	7
1.2 研究现状	13
1.3 本书研究的范围、思路和方法	24
2 岩体力学特性研究	27
2.1 岩体的模型	27
2.2 岩体物理力学参数	30
2.3 煤系地层开采及其变形参数研究	34
2.4 岩体条件的不确定性	36
2.5 等效连续体的强度及变形参数研究	36
本章小结	40
3 三维重力相似模型模拟试验研究	41
3.1 模型相似常数选择及模型设计	41
3.2 煤系地层模拟	42
3.3 模型相似材料的选取及结构面模拟	44
3.4 小模型试验及其主要结论	45
3.5 大模型试验过程	47
3.6 大模型试验成果分析	50
3.7 危岩体变形破坏机理及发展趋势分析	59
本章小结	62
4 块体稳定及其可靠性分析	63
4.1 考虑滑面变形的块体稳定分析法研究	63
4.2 计算成果与小模型试验成果对比分析	71
4.3 T_8-T_{12} 缝段整体稳定性分析	73
4.4 T_8-T_{12} 缝段分块体稳定性分析	76
4.5 五万方危岩体稳定性分析	77
4.6 五万方失稳后 T_9-T_{12} 缝段稳定性分析	80
4.7 危岩体稳定性的可靠性预测	81
本章小结	83
5 正交异性等效连续体的有限元分析	84

5.1 有限元分析计算方案.....	84
5.2 用 Hoek-Brown 准则确定 Drucker-Prager 准则参数 α 、 κ	85
5.3 各计算方案参数取值.....	87
5.4 计算结果分析.....	90
本章小结	93
6 主要结论及对防治监测工作的建议.....	94
6.1 主要结论.....	94
6.2 防治工作建议.....	95
6.3 监测资料分析及监测工作建议.....	96
附录 Bieniawski 工程岩体分类系统	97
参考文献	99

总 论

0.1 研究背景

链子崖危岩体位于著名的长江三峡西陵峡西部,湖北省秭归县新滩镇境内,与北岸黄崖对峙,形成兵书宝剑峡,如图 0-1 及 0-2 所示。链子崖危岩体下距湖北省宜昌市 73km,上距秭归县城 14km。

区内属峡谷地貌,河谷深切,岸坡陡峭,临江山顶高程在千米左右,河床狭窄,河水湍急,十分险峻。

该地区岸坡地质灾害常有发生。据历史记载,自公元 100 年至今,已发生过规模较大的滑坡岩崩 14 次,其中,公元 1030 年和公元 1542 年规模最大,曾分别阻江碍航 21 年和 82 年。

链子崖危岩体位于出入四川长江航道的咽喉,地理位置十分重要。该危岩体对西陵峡航道形成严重的威胁,是一个重大的地质灾害隐患,特别是危岩体北区的 T_8-T_{12} 缝区,体积约 200 万 m^3 ,一旦崩塌失稳,将直接滑入长江主航道。该危岩体岩块巨大且坚硬,在急流的江水中,将难以在短期内清除,对川江航道造成长期碍航,并可能对西南地区国民经济建设造成严重影响。因此,该地质灾害引起了有关方面的重视。

1964 年,应交通部的邀请,地质部首次对链子崖危岩体进行了现场勘探,并指出了问题的严重性。此后,国家有关部委和湖北省政府曾多次组织调查,并组成相应的机构进行了必要的地质勘探、岩石试验和力学计算等工作,建立了变形观测系统,并多次召开学术讨论会。参加该项工作的单位很多,主要有国家科委、交通部、地质部、水利部、中国科学院、铁道部以及各院校、科研机构等。在长达 30 年的研究中,积累了大量的资料,特别是地质和变形观测资料比较丰富。

1985 年 6 月,链子崖对岸的新滩镇发生了 2000 万 m^3 的大型滑坡,其中约有 300 万 m^3 入江,停航 12 天。这一地质灾害的涌浪危害波及上游的香溪镇。这一事件引起了有关部门对链子崖危岩体的再度重视。

1985 年,国家科委将此项工作列入“七五”国家科技重点攻关项目。在研究中,许多单位又提出了一些比较好的研究报告,丰富了链子崖危岩体的资料库。

1989 年 3 月 8 日,国务院决定对长江航道威胁最为严重的链子崖危岩体和黄腊石大型滑坡体两处地质灾害进行防治工程研究,并决定由 8 个有关部委和湖北省政府领导组成 10 人防治工作小组,湖北省成立了现场指挥部负责日常工作。从此,链子崖危岩体由调查研究和学术讨论转入了工程防治研究。

此后,又系统地补充了地质试验、监测通讯和应急措施(排水)等项工作,并由铁道部第二勘测设计院、交通部规划设计院、水利部长江水利委员会参加防治工程的可行性研究,进行了多方案的比选,于 1990 年下半年该项工作结束。在此基础上,由水利部长江水利委员会编制防治工程可行性研究正式报告。

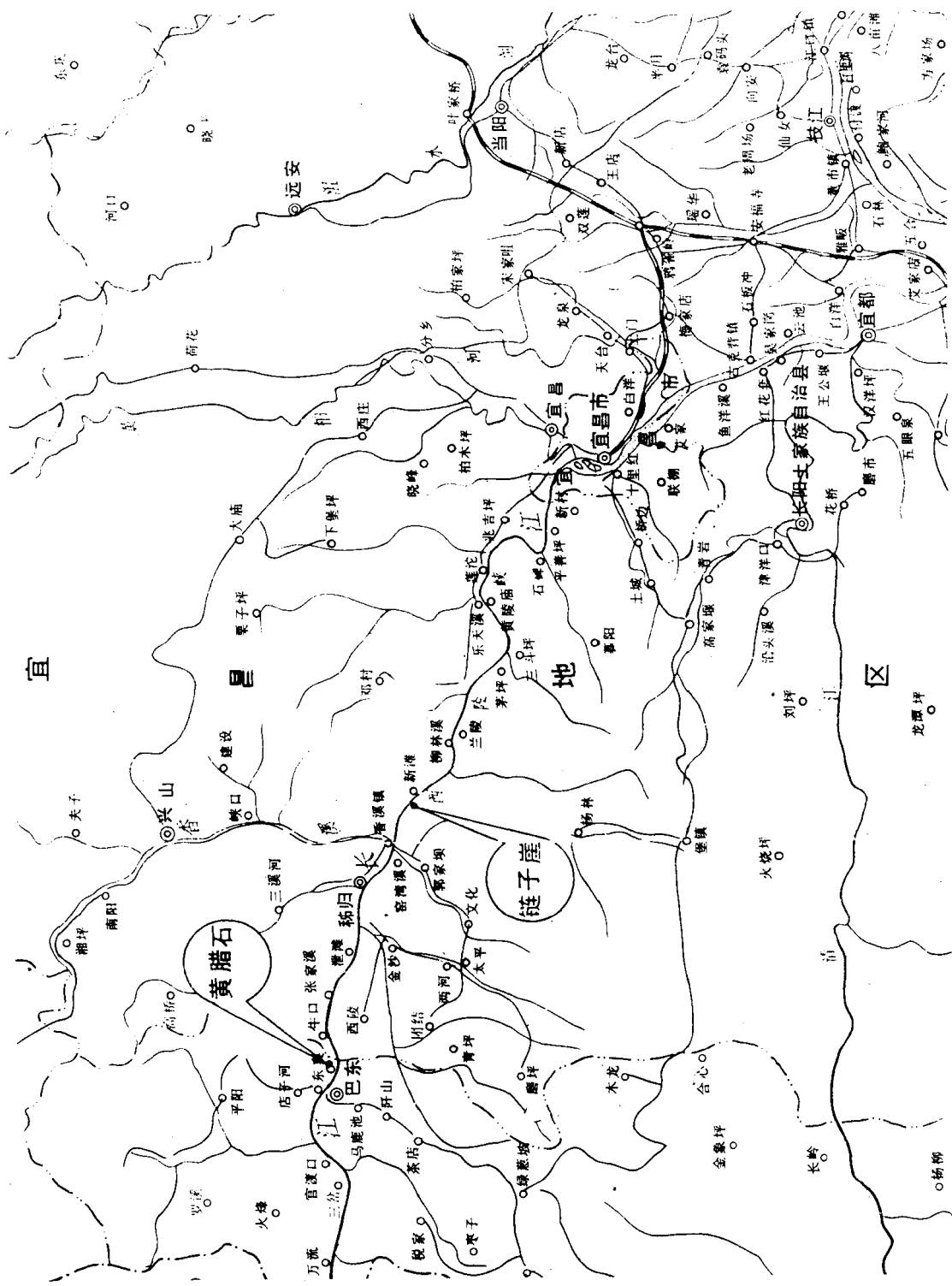


图 0 1 长 江 三 峡 链 子 崖、黄 腊 石 地 理 位 置 示 意 图

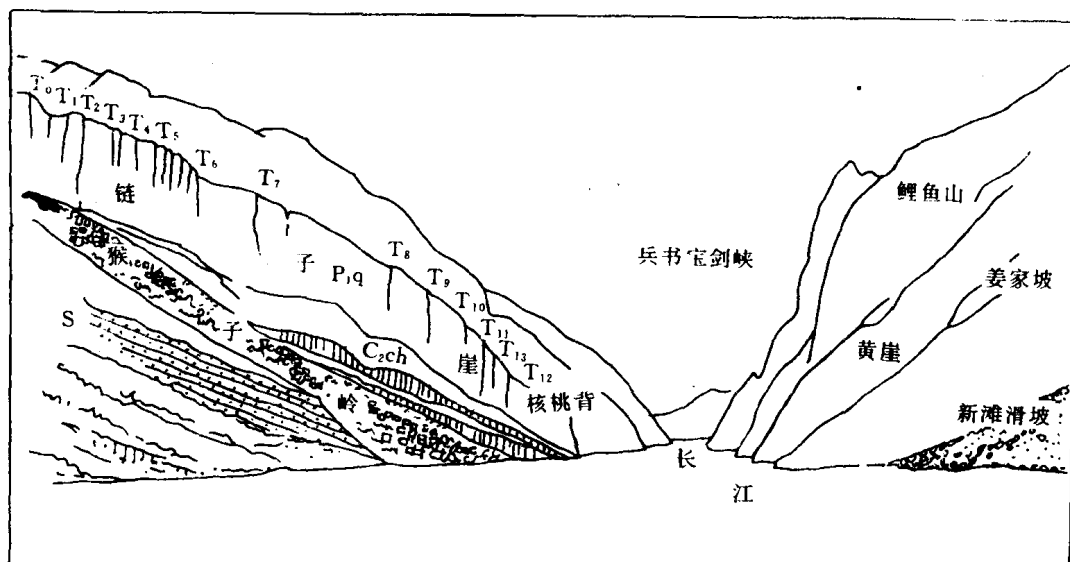


图 0-2 长江两岸链子崖、黄崖地貌素描草图

鉴于链子崖危岩体自然条件极其复杂,长期以来,各方面对其力学机理和破坏趋势的认识一直存在着比较大的分歧。在防治方案比选工作中,各方案也有较大差距,防治方案亦不十分完善。造成以上分歧的原因,主要是各部门工作性质不同,认识各有侧重而缺乏全面系统的概念。

岩石力学是一门系统工程,它涉及多学科,专业之间的跨度又很大。要妥善解决岩石工程问题,必须建立相应的系统工程,否则,其研究成果必定有很大的片面性,认识上不能统一,解决问题不可能恰到好处,甚至可能忽视某些重要因素而导致工程的失败。

由于该地质灾害潜在危害的严重性以及举世瞩目的三峡工程建设带来的威胁,在前人研究的基础上,笔者对链子崖危岩体的稳定性及防治工程的原则方案作了进一步的全面研究,供有关部门工作和领导决策时参考。

为此,在对链子崖危岩体的基本资料、岩体模型、稳定性和工程措施作全面分析之前,对岩石力学的基本原则和链子崖危岩体研究的基本要点先作简要分析,以利指导本书对链子崖危岩体稳定性及防治工作的研究。

0.2 研究指导思想

0.2.1 当前岩体工程研究的特点

(1)充分利用岩体自身的承载能力。岩体本身是一种可利用、可依靠的资源,是天然建筑材料。但是,一般岩体均被构造节理切割成为不均质、各向异性和客观条件十分复杂的岩体。因此,要在这类岩体中建成岩体工程,必须适应当地的岩体条件,充分利用该岩体自身的承载能力,通过各种有效的手段,使这类不均质的岩体成为完整的岩体结构。这是岩体工程科技人员的基本任务。

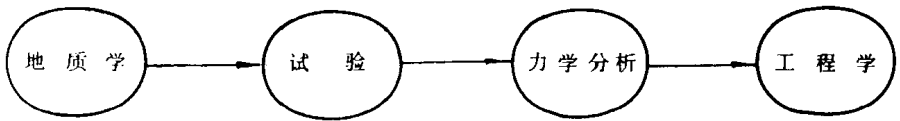
(2)先进设备、仪器、工具的广泛应用。由于现代施工技术的发展,电子计算机的广泛应用,

以及先进施工机具的试验测试仪器的不断完善,使人们对这类极其复杂的岩体的研究、分析和具体工程处理能够成为现实。为了完成岩体工程任务,必须善于充分利用这些先进的手段。

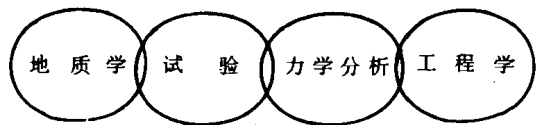
(3)全面研究——系统工程研究。岩体工程研究涉及多专业,如地质学、力学和工程学等,特别是要深入研究它们之间的关系。单学科的研究是必要的基础条件,但是还需要有充分条件,这就是将众多的单学科有机地结合起来。只有在这样的必要条件和充分条件均具备的情况下,岩体工程的研究才能落到实处。鉴于上述岩体工程涉及的专业覆盖面非常宽,并应避免孤立地研究问题,因此,岩体工程研究应强调建立研究系统——针对不同岩体条件建立相应的研究系统。

现用几个图形说明各专业工作在系统中的关系。

①各专业孤立地研究(如下图),是当前按专业分工的一种工作方式。

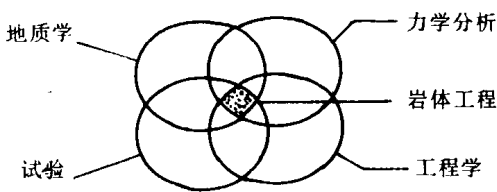


②实际工作中,各专业之间有一定的联系(如下图)。



③强调各专业之间的有机结合,建立如右图所示的工作系统。

以上简明地表达了各有关专业有机结合的重要性及第三个工作系统是最优方式。



(4)全面研究,并掌握工作重点。由于岩体工程涉及的专业面非常宽,研究工作又不可能面面俱到,因而,必须掌握工作重点,否则,工作量将十分巨大,工作也可能杂乱无章、事倍而功半。因此,研究岩体工程,既要将它们有机地结合起来,又要掌握重点,这就是岩体工程的灵魂。

(5)多学科知识和广泛的工程实践经验。由于岩体条件各异,各岩体工程性质差异极大,因此,掌握多学科知识以及广泛的工程经验,是从事岩体工程科技人员所必需的基础条件。

0.2.2 岩体工程研究原则

(1)充分认识岩体。前述岩体工程客观条件十分复杂,而人们又要充分利用它们自身的承载能力,因此,首先必须充分认识岩体客观条件。这里包括地质勘探、地应力场测试及分析、力学计算和模型试验等。这是一项十分重要的基础工作。

(2)尽力保护岩体。既然岩体工程研究的工作原则是充分利用岩体自身的承载能力,那就应该在岩体工程设计和施工建设过程中,避免对岩体产生不必要的损伤或过多的破坏。因此,应尽力保护岩体。

(3)有效而适时地支护岩体。岩体内有多节理、裂隙和断裂构造等软弱结构面,任何岩体工程均需进行必要的支护和加固。不同的建设程序在岩体中将产生不同的应力状态。因此,这里

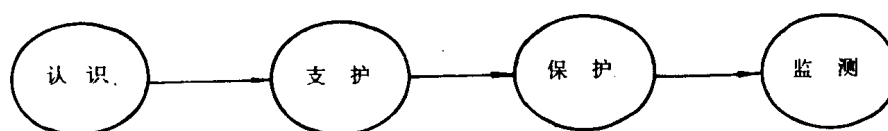
还必须强调,加固工作必须有效而适时地有序进行。

(4)全过程监测岩体。鉴于岩体规模巨大,即使是岩体力学造诣很深、工程经验十分丰富的专家,对某一岩体的认识和研究也不可能绝对精确,确定的工程措施也不可能极其准确。因此,在岩体工程建设中,必须进行全过程监测,以补充以往工作中认识的不足,并对工程安全进行必要的监视。据此,对工程的设计及施工等参数须进行调正,使之逐步完善。

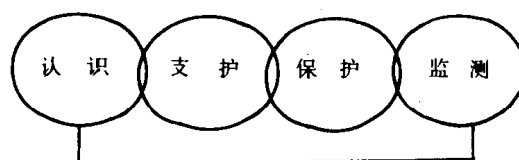
上述对于岩体工程研究的四点说明,是根据岩石力学和工程研究的逻辑关系所作的简要解释,也可以说是岩石力学与工程的四项原则。这四项原则较缪勒(奥)对新奥法(NATM)解释的 22 条原则具有更好的逻辑性和更明确的目的性,因此较之更为完整。

(5)四项原则的逻辑关系。在执行以上四项原则过程中,必须充分考虑它们之间的有机联系,使各项工作之间紧密结合,才能获得最佳效果。用如下关系图说明将更为醒目。

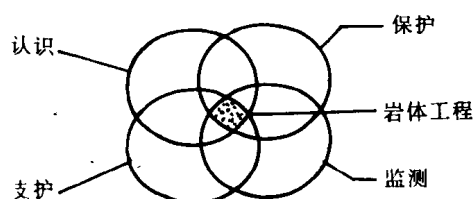
①以往一般的工作程序是:



②近年来许多专家提出了监测控制法,强调反分析。实际工程中,它们之间也发生了许多联系,现用图说明:



③建议在岩体工程研究中建立如下工作关系:



图中所示各图圆圈的大小,表示该项工作的范围及其重要性。这里首先强调认识岩体,其次是保护岩体,第三是支护岩体,最后是监测岩体。而常规的工作方法将认识岩体放在首位,其次是支护岩体,最后才是保护和监测岩体。与常规工作方法不同的是这里强调了保护岩体。近年来这方面已有很大进展,但是还未能得到广泛和足够的重视,因此,常有事故发生。

上述岩石力学及岩体工程的四项原则及其相互的逻辑关系是研究岩体工程的一般原则。

0.3 链子崖危岩体防治工程研究工作要点

根据上述岩体工程研究工作四项原则以及针对链子崖危岩体具体工程条件,应遵循以下工作重点:

(1)在认识岩体研究中,链子崖危岩体的地质调查勘探资料比较丰富,但是,对关键性部位

的关键性问题的调查研究论述还不足。如图 0-2 中 T_{12} 缝的空间展布、不同区段不同作用力及其不同力学参数的研究,距要求有很大差距;又如最重要的煤层采空区资料很不一致,且不准确,几个钻孔资料内容差距也很大,野外工作中也难以进一步将其查清。因此,对煤层采空区的深入研究是非常重要的,这是对危岩体的变形及发展趋势研究的基础。

鉴于煤层采空区情况不明,煤柱、矿碴力学参数的取值应予特别认真的研究。危岩体变形中,岩体有关参数也相应发生变化。因此,应考虑危岩体在不同变形阶段岩体参数应有不同取值这个十分重要的特点。

危岩体已有过很大的变形,目前仍在变形中,因此,力学分析及模型试验中均应考虑过去、现在以及将来不同变形阶段中的力学特点,以研究其发展趋势。

(2)保护岩体的原则在该工程研究中应得到特别的重视。该危岩体仍在变形中,某些方面还在继续失去平衡,如再有不利的扰动,则可能加大其变形速率,危害性很大。1979 年在该处打探洞时,曾发生过急剧的变形。另外,目前在防治方案比选阶段中,几个设计方案对此均未能给予足够的重视。因此,应充分强调保护岩体的重要性,不仅在设计方案,在施工程序及各施工工序中,均应充分考虑和遵守本项原则。

(3)支护岩体是本项工程的主要任务。在此工程条件下,“有效而适时”的要求十分重要。“有效”是指加固工程的标准,“适时”这一要求应在每一个施工程序和工序中遵守。概括起来,有以下几个具体问题应予考虑:

①防治大规模岩体坍滑入江,避免大石阻碍航道,避免上部岩体产生新的、高度更大的临空面,以致产生新的、规模更大的危岩体。

②防治某些关键块体滑移崩坍,它可能恶化链子崖危岩体稳定性,但不必对每一块危岩体进行防治。

③该地区山谷陡峻,地形狭窄,施工条件差,因此,工程规模不宜过大,劳力不宜过多。

④每一个施工程序必须较前一个工作状态有更高的安全度。每个施工工序必须有充分的准备,在出现不测情况时能及时得到处理。

(4)监测工作在这里也有它的特殊性。地表和地下监测资料应十分醒目,特别需要重视某些关键块体的直观监测。另外,在每一个施工程序和每一个施工工作面,均应设置临时的监测系统,以监测该工作面的安全。对各工程措施受力情况也应进行监测,以判别其工程措施效应。

由于认识岩体是一项十分重要的基础工作,因此本书的重点放在对链子崖危岩体的变形破坏机制及稳定性的认识方面。

1 研究现状概述

1.1 危岩体主要工程地质条件概述

1.1.1 地貌与地层

链子崖危岩体位于长江三峡西陵峡中兵书宝剑峡出口南岸。区内河谷深切,岸坡陡峭,属



图 1 1 链子崖危岩体全貌(据铁道部第二勘测设计院)

中高山峡谷地貌。危岩体近南北展布,长江江面宽约 300m,峡口内外长江强烈下切,形成深槽。最低处海拔高程约为 -3.0m,如图 1-1。

该地区处于鄂西暴雨区,河谷地带多,年平均降雨量为 996.0~1248.3mm,山区达 1190.3~1390.8mm。降雨时间集中在 5~9 月,雨量占全年的 68%,并常有局部暴雨发生,最大日降雨量达 111.1mm。

长江水量丰沛,平均流量为 $1.43 \times 10^4 \text{m}^3/\text{s}$ 。常年水位为葛州坝水库回水高程,约 66m。流量洪枯变化约 15~26 倍,相应水位变化约 30m。

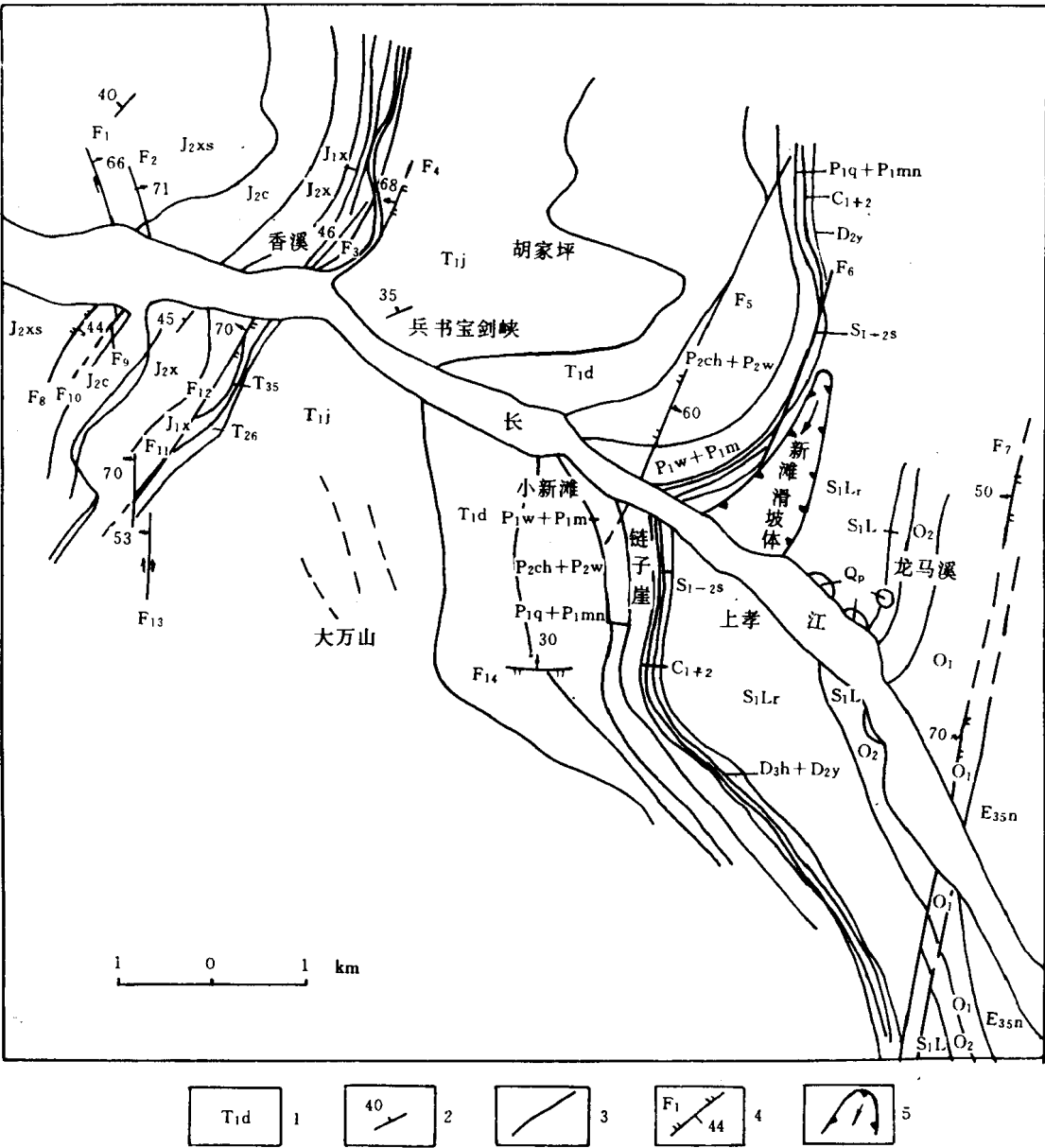


图 1-2 链子崖地区地质图(据湖北省水文地质大队)

1—地层代号;2—地层产状;3—地质界线;4—断裂及编号;5—滑坡体

危岩体区域范围内自东向西出露的地层有志留系(S_2)、泥盆系(D_2)、石炭系(C_2)和二叠系(P_1)等地层,其中二叠系栖霞灰岩(P_{1q})厚约 190m,组成链子崖危岩体的本体,下部有厚度不

大的马鞍组(P_{1mn})煤系软层(R_{001}),并已大面积采空,以致形成上硬下软的不良岩体结构。其地层展布如图 1-2。

煤系地层下部为厚层黄龙灰岩,岩性坚硬完整;煤系地层顶板即危岩体的下部为厚层瘤状灰岩(P_{1q_1}),厚约 25~29m,其中夹薄层炭灰质页岩形成的软弱夹层有 R_{101} — R_{107} ;危岩体中下部有厚层灰岩(P_{1q_2}),厚约 73~85m,其中夹炭质泥质灰岩和泥质条带形成的软弱夹层有 R_{201} 、 R_{202} 和 R_{203} 等;危岩体中上部为巨厚层灰岩(P_{1q_3}),厚约 12~18m,在底部有薄层泥灰岩,形成 R_{301} 软弱层;危岩体上部为中厚层疙瘩状灰岩(P_{1q_4}),其中夹薄层至中厚层钙质灰岩,厚约 37m,底部有 R_{401} 、 R_{402} 等软弱夹层,其顶部仍有厚约 23m 的厚层疙瘩状灰岩夹泥层分布;岩层总厚约 190m。

1.1.2 地质构造与地震

(1)链子崖所在地区处于黄陵背斜西翼,与秭归向斜东翼毗邻。东侧 2km 处有 NNE 向九湾溪断层,西南 5km 处有 NNW 向仙女山断层通过,地层呈单斜构造,如图 1-3。链子崖危岩体位于长江南岸,在平面上呈南北展布,长约 700m,东西宽为 30~180m,北部有长江切割,东部为猴子岭崩塌体缓坡洼,形成北部和东部两个临空面,外侧为高百余米的陡崖。西部和南部在地形上与山体成为一体,但被 58 条宽大裂缝所切割,形成了 T_8 — T_{12} 缝段北区、 T_7 缝段中区和 T_0 — T_6 缝段南区 3 个危岩体,总体积约为 288 万 m^3 。

(2)危岩体的基础为巨厚层黄龙灰岩,危岩体本身为栖霞组灰岩,其中有部分软弱夹层,危岩体底部为厚度不大的煤系地层,并已大面积采空,岩层走向 $NE30^\circ\sim50^\circ$,倾角 $NW26^\circ\sim36^\circ$ 。软弱夹层按其厚度分为 3 级:

一级:马鞍组煤系地层,厚度 1.6~4.2m,即 R_{001} ;

二级:厚度大于 20m,为 R_{201} 、 R_{202} 、 R_{203} 、 R_{301} 、 R_{401} 、 R_{402} ;

三级:厚度 5~20cm,为 R_{101} — R_{107} 。

(3)危岩体内共有断层 9 条,为 F_3 、 F_4 、 F_6 、 F_7 、 F_8 、 F_9 、 F_{26} 、 F_{27} 等,规模都不大,其中:

F_3 位于危岩体北区,是西侧边界,即 T_{12} 缝,产状为: $NW5^\circ\sim8^\circ/NE50^\circ\sim77^\circ$;

F_4 位于危岩体北区,与 F_3 近于平行,与 T_{14} 缝相关,产状为: $NW10^\circ/NE87^\circ$;

F_9 位于危岩体北区中部,形成 T_9 缝,产状为: $NW40^\circ/NE83^\circ\sim90^\circ$;

F_8 位于危岩体南区,形成东侧边界,产状为: $NE10^\circ\sim35^\circ/SE45^\circ$;

F_7 位于危岩体南区,形成 T_6 缝,产状为: $NE20^\circ\sim25^\circ/SE70^\circ\sim78^\circ$ 。

(4)裂缝发育按其深度可分为 3 级:

一级:裂缝深度在 100m 以上,并切割到煤层,规模较大,有 T_8 、 T_9 、 T_{12} 、 T_7 、 T_1 、 T_2 及 T_6 ;

二级:裂缝深度在 70~90m 左右,规模较小,有 T_{11} 、 T_{13} 、 T_0 、 T_3 、 T_4 及 T_5 ;

三级:裂缝一般为支缝组,如 T_8 支缝、 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_6 支缝、 T_{14} 、 T_{16} 等。

(5)裂缝发育主要有 NWW 组,其他有 NNW、NW 和 NE 组。

①NWW 组:走向 $N70^\circ\sim80^\circ W$,倾角 $70^\circ\sim80^\circ$,该组裂缝四级结构面最大线密度为 5 条/5m;

②NNW 组:走向 $N10^\circ\sim20^\circ W$,倾角 $60^\circ\sim90^\circ$,该组裂缝四级结构面最大线密度为 3 条/5m;

③NW 组:走向 $N40^\circ\sim60^\circ W$,倾角 $40^\circ\sim60^\circ$,该组裂缝四级结构面最大线密度为 8 条/5m;

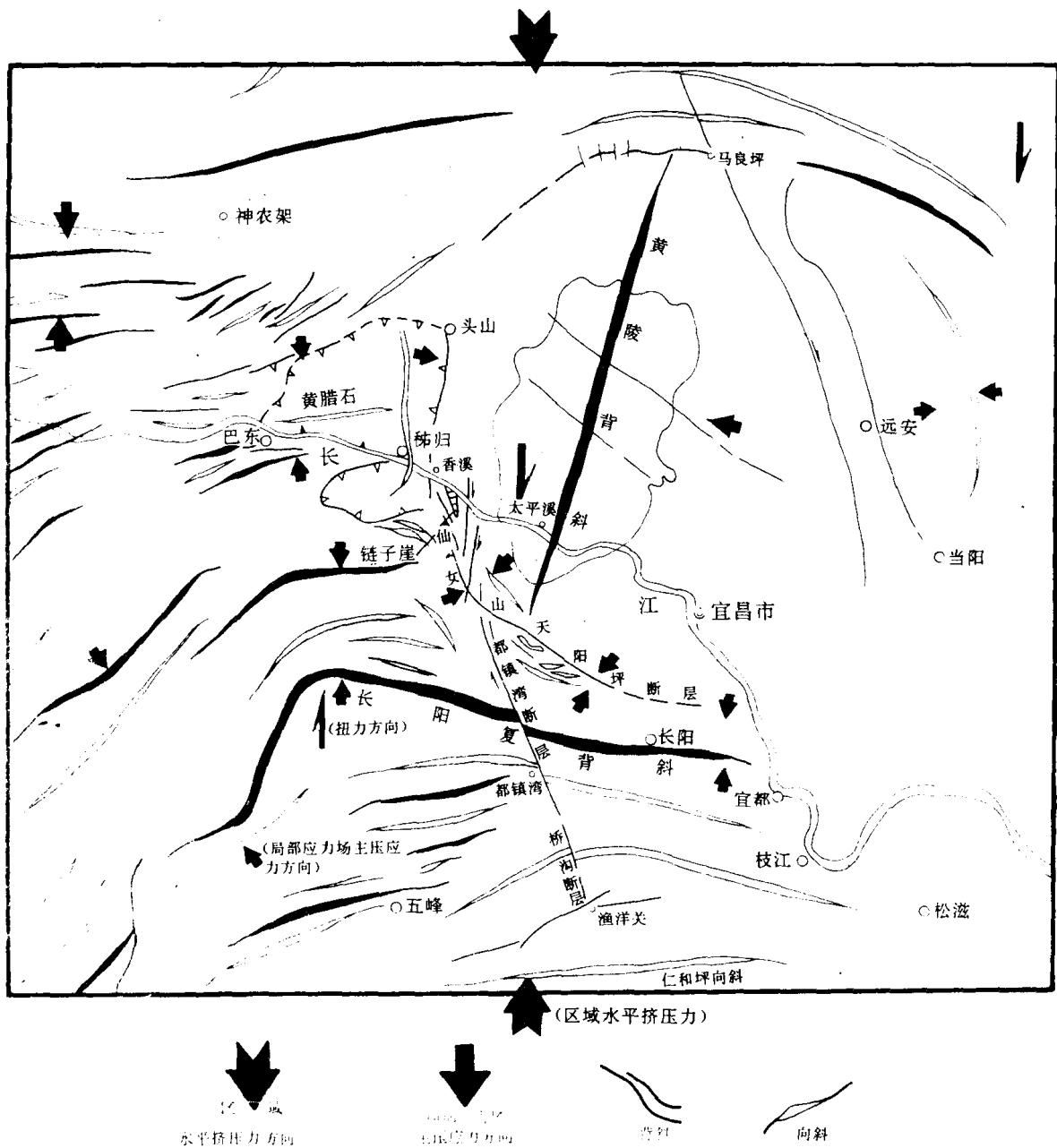


图 1-3 长江三峡地区地质构造 据长江流域规划办公室 1965 年

①NE 组：走向 $N25^{\circ}\sim 45^{\circ}E$ ，倾角 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ，该组裂缝四级结构面最大线密度为 7 条/5m；

(6) 本区属弱震环境，经鉴定，地震强度为 VII 度，基岩峰值水平加速度限值范围在 100 年超概率 4~6% 条件下，为 $145\sim 170\text{cm/s}^2$ 。

1.1.3 煤层开采情况

危岩体底部为马鞍组煤系地层，厚 1.6~4.2m。由于紧邻长江，运输便利，该煤层前后约开采了 500 年，1965 年因发现岩体变形而停止开采。60 年代，湖北省水文地质大队调查发现有 22 个老煤洞，长者达 400m，如图 1-4 所示。其主巷道大体沿岩层走向延伸，方向为 $NE30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ，高 1.6~3.0m。

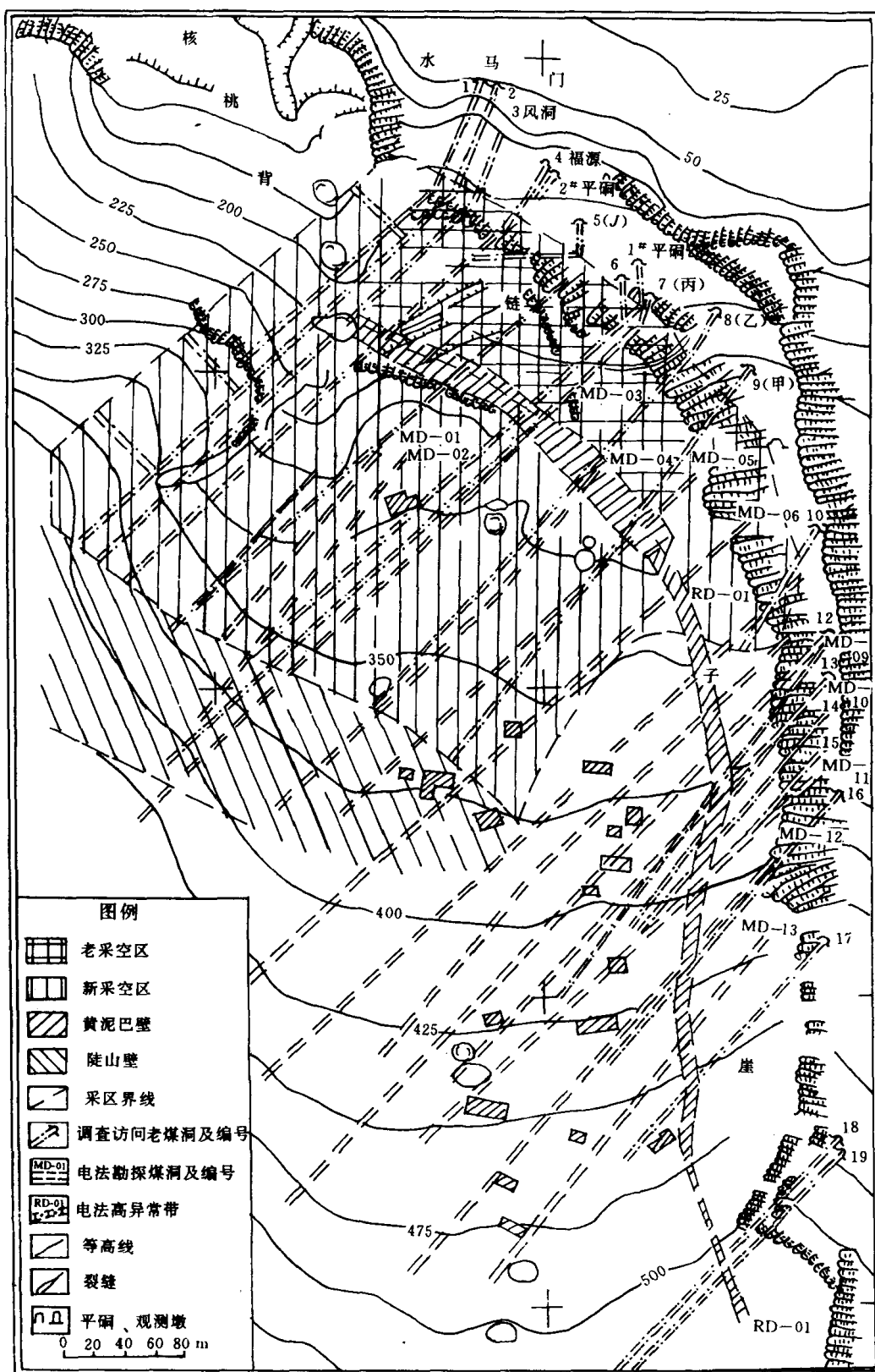


图 14 链子崖危岩体采空区、煤洞分布图 (据湖北省水文地质大队)

1988年,地质矿产部方法研究所用声频大地电场法和综合电磁法勘测煤洞14条。所有调查资料均表明开采面积约20万 m^2 。1969年,地质部三峡工作处调查1号洞内采空率为42~47%;1979年湖北省水文地质大队调查2号洞内采空率为58.5~75%,1980年调查6号洞内采空率为67.3%。

值得注意的是, T_8-T_{12} 缝段的采空最为严重。整个采区以 T_{8-1-1} 缝为界,其北为老采区,采高1.6~3.0m;其南为新采区,煤层变薄仅0.1m,采高仅0.7m。新老采区之间有一条“黄泥巴壁”。老采区的采空情况是:

(1)采空率为68~90%,大部分回填矿渣,矿渣有被压密现象,大体是靠江侧明显,矿渣与煤洞顶板紧密接触,局部显层状;

(2)采空区均没处理,任其自然冒顶,但煤洞顶板为厚层瘤状灰岩,属矿山一级顶板,顶板十分完好,平硐内见被主裂缝(T_8 、 T_9 缝)切割,裂缝在顶板上呈“人”字型发育,切割顶板呈断梁状;

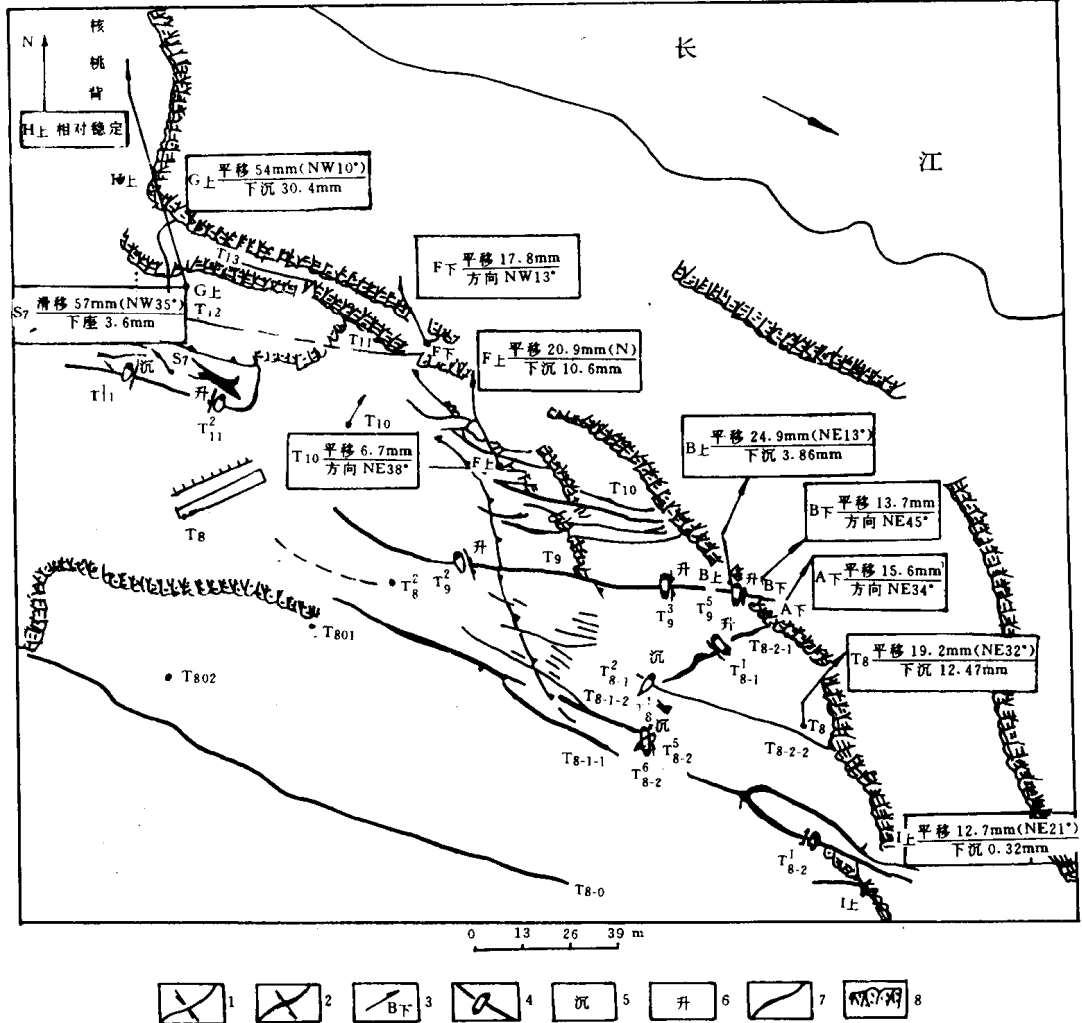


图 1-5 T_8-T_{12} 缝段观测点位移场图 (据湖北省岩崩滑坡研究所)
 1—裂缝闭合;2—裂缝张开;3—位移矢量;4—裂缝相对位移测点;
 5—下沉;6—抬升;7—裂缝;8—陡崖