

云南蒙自五里冲水库岩溶及其工程处理^①

康彦仁¹, 张邦仞²

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所 广西桂林 541004; 2. 红河州水电局, 云南个旧 661100)

摘 要 五里冲水库个旧组(T_2^g)灰岩, 岩溶极其发育, 其中尤以洼地深、峰丛高、溶洞多又大, 地下河管道单一较长、岩溶总体发育历史悠久为特点, 以更新世以来岩溶最为发育, 现今地下河管道主要形成于晚更新世至今。因区域地壳持续抬升, 岩溶没有成层发育的规律, 但自上向下递减现象明显。工程上五里冲水库是以帷幕高压灌浆技术为主辅以其它多种方法处理溶洞及封堵地下河, 利用天然盲谷成库的一座无大坝中型水库。帷幕高压灌浆技术先进、便捷、可靠。水库蓄水已达设计水位, 发挥了效益。一年可向蒙自县供水 8161 万 m^3 , 可增加灌溉面积 10 万亩, 改善灌溉 2.3 万亩, 向城市及工业供水 1210 万 m^3 , 使蒙自水利化程度由 37% 提高到 70% 以上。

关键词 五里冲水库 岩溶 高压灌浆 工程处理

中图分类号 P642.253

文献标识码 A

1 概述

五里冲水库位于云南省蒙自县城南, 南盘江流域与红河流域分水岭上的绿水河源头, 是靠封堵五里冲地下河及主要用帷幕高压灌浆处理岩溶地层渗漏, 利用天然岩溶盲谷堵洞、防渗形成的无大坝中型水库(图 1)。其库容 7949 万 m^3 , 正常蓄水高程 1458m, 蓄水深 106m(不含地下)。帷幕三层(见图 1, 自东向西依次为上、中、下层)总长 3928m, 最大幕高 260m, 总面积 26.2 万 m^2 。完成帷幕灌浆钻孔 3000 多个, 进尺 21 万米多, 灌浆压力 4~6MPa, 单孔水泥最大注入量 626t, 平均水泥单耗量 152kg/m。工程施工中各类勘探钻孔、平硐遇大小溶洞 318 个, 钻孔遇洞率 32.64%, 线岩溶率 5.77%, 遇最大溶洞体积近 14 万 m^3 。南部连结帷幕的防渗墙处于 KM7 与 KM8 两大溶洞间, 防渗墙最大高度 105m, 厚 2.5m, 宽 50m, 封堵地下河管道的混凝土塞 4031 m^3 。帷幕北部处理的溶洞塌陷体体积大于 10 万 m^3 , 面积大于 3200 m^2 。

水库于 1995 年 7 月 1 日下闸蓄水, 1997 年已开始向蒙自供水, 发挥效益。水库的建成, 将大大地改

善蒙自县的供水状况, 一年可向蒙自供水 8161 万 m^3 , 可增加灌面 10 万亩, 改善灌面 2.3 万亩, 向城市及工业供水 1210 万 m^3 , 可使蒙自水利化程度由 37% 提高到 70% 以上, 是振兴蒙自经济的一项重要工程。

五里冲水库是在地质条件十分复杂, 岩溶极其发育的地区建成的一项水利工程, 它不单是我国岩溶地区无大坝中型水库的骄骄者, 其工程揭露的岩溶问题的复杂多样, 溶洞间防渗墙超高超薄, 帷幕灌浆工程的巨大, 以及高压灌浆技术的先进、便捷、效益的显著等都不失是一座宏伟的工程, 在岩溶地区改造自然, 造福人民方面亦是一项伟大的壮举。

2 自然地理地质背景条件

五里冲水库地处我国云南高原南延部分, 标高 1350~2200m, 年均气温 17℃ 左右, 年降雨 1300~1400mm, 气候具有干湿季分明、夏无酷暑、冬无严寒和多雨温暖湿润的特点。五里冲河平均流量 0.46 m^3/s , 在落洞处(见图 1)流入地下, 成为五里冲地下河——第一九股水(位于龙宝洞以南, 已超出工作

^① 作者简况: 康彦仁(1936-)男, 教授级高级工程师, 主要从事岩溶地区环境、工程地质方面的研究工作。
收稿日期 2002-01-18

区范围)源头,落洞口标高 1352m。地质上它位于我国云南南北向构造带的南延部分与红河北西向构造的交接地带。水库区由一岩溶盲谷及发育于砂板岩区的南北两支沟组成。库区处于三叠系个旧组(T_2g)碳酸盐岩与寒武系歇马场组(ϵ_{3x})非碳酸盐岩南北向断裂接触带两侧(图 1),个旧组为灰岩、白云岩组成,其岩溶十分发育。歇马场组由砂板岩组成,其面积广大。个旧组岩溶地层断裂构造发育,近南北

向的 F_1 断层是主控断裂,纵贯库区,并成为非岩溶区与岩溶区的分界线。此外,其北西向、北东向及近东西向断裂都较发育,把库区岩层切割成块状。个旧组灰岩,在枢纽区为其第三段(T_2g),厚约 500m 除中部($T_2^{s-2}g$)有 27~65m 厚的黑色夹碳质板岩的薄层生物碎屑泥晶灰岩外,均为质纯层厚,可溶性强的厚层至块状的泥晶、亮晶灰岩,地层一般陡倾至直立。

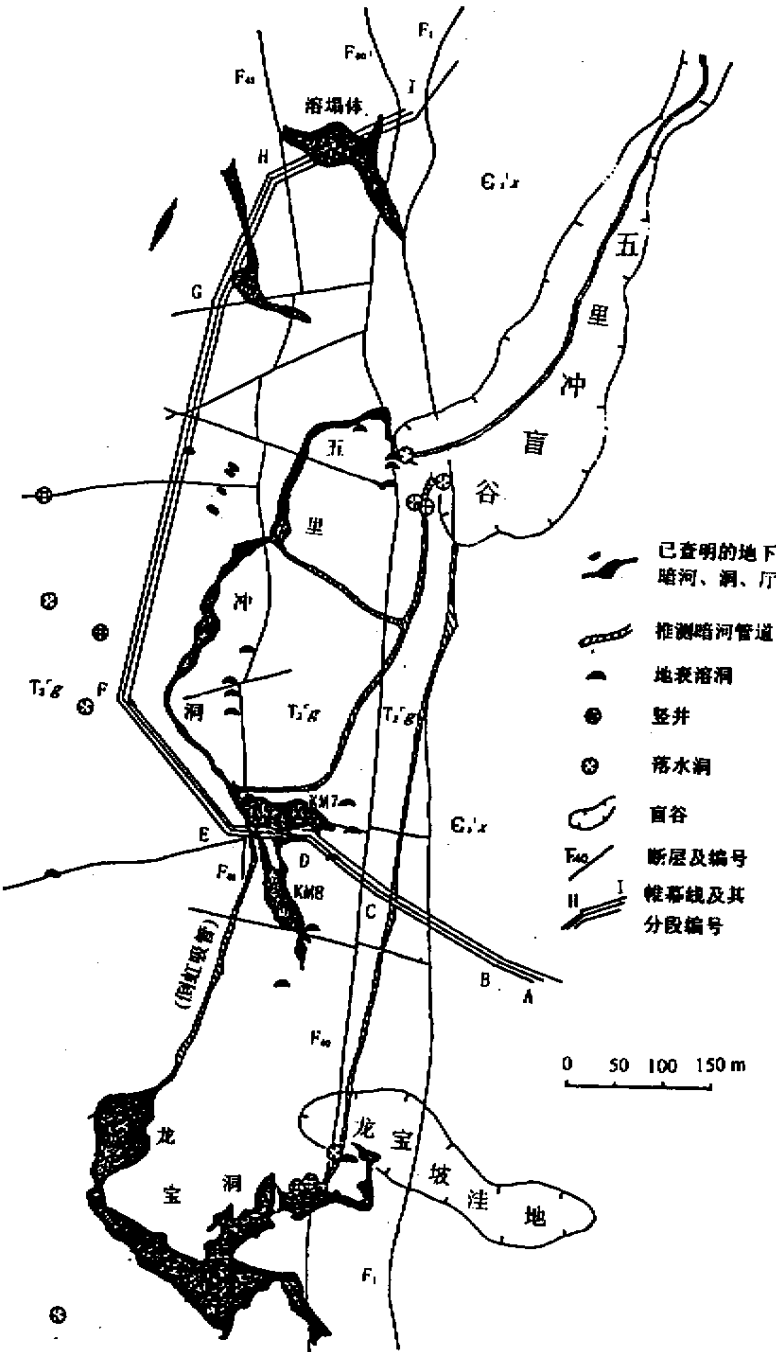


图 1 五里冲水库枢纽区岩溶地质图

五里冲水库区处于岩溶山地与非岩溶的中深切割的中山山地接触带上,两者以盲谷、串珠状洼地、漏斗等相连接。岩溶山地在楚冲一带保留了高原岩溶特征,其地表呈台地状,有浅洼地、漏斗、竖井及风化残积的粘土等,标高在 1700~1800m 以上,高出盲谷底部 300~400m 多。盲谷四周多陡岩、斜坡、溶洞。在盲谷以南沿 F_1 断层向南发育了龙宝坡、斯白邑……等一串近南北向深洼地。五里冲地下河与这些洼地有着成生上的密切联系。五里冲河在落水洞注入地下,渠流 549m 后再次潜入,在其南龙宝洞内又可见水流,至 9~11km 后于标高 1200m 及 1130m 的小窝子及座坡以泉流形式溢出,再沿峡谷地形汇入绿水河。绿水河在汇入红河处标高仅 130m。

值得说明的是,五里冲水库,仅有集雨面积 25.4km²,库水大部分靠已建成的提引工程引提东侧相邻的南溪河上游支流水补给。

3 岩溶发育特征

岩溶是可溶岩体在有利的地质环境下,岩—水—气—生物相互作用,在地表地下均有发育的一种地质现象。研究岩溶发育问题,既要注意它发生发展的条件,更要重视它在特定的环境下形成的地表地下形态、分布、堆积物及其组合情况和规律。作为水利工程,将以其是否稳定,能否蓄住水(不渗漏或少渗漏)为重要条件。五里冲水库区,由于有利的岩溶发育条件,长期处于云南高原的抬升过程中,岩溶发育除具一般岩溶区地表地下形态多样、地下洞穴多、沉积物丰富外,以其洞穴规模巨大、岩溶管道发育、洞穴沉积具多期性为重要特点。现将一般岩溶现象、规模、五里冲地下河管道系统及工程揭露的岩溶特征等论述如下:

3.1 岩溶形态和规模

3.1.1 地表岩溶形态

五里冲地区大部分属受红河水系影响强烈的常态中山山地及少量岩溶山地,其山地岩溶大的形态在地表有峰丛、洼地、斜坡、台地、峡谷、谷地、漏斗等,并以其峰丛较高、洼地漏斗较深、峡谷发育为特点,较小的形态如石牙、丘岗、小溶洞、石钟乳、钙华等也较发育。残留的溶丘台地标高 1650~1800m,地表舒展平缓,有几米厚的风化残积粘土分布,竖井较多,局部有残丘、浅洼地,峡谷深长,高差数百米。各种岩溶形态反映出该区岩溶发育历史悠久,但大多为中新世以

来,尤其是更新世以来岩溶作用的产物,它们大多是以五里冲地下河管道系统为排水通道而发育起来的。洼地可深达 100~160m,峰高 200~300m 以上,地表见有溶洞 30 多个,大的洞穴中可见多层外源水带入的砂卵砾石、粘土与钙华沉积,并见有崩塌堆积的巨大块石混杂其间。显示此区地壳垂向活动剧烈,有过振荡,岩溶排泄基面不断下移变迁。

3.1.2 勘探工程揭露的地下岩溶现象

五里冲水库工程,主要是一个地质工程,在不到 2km² 范围内,动用了总长约 5000m 的各类勘探平硐、灌浆廊道,近 400 个各种勘探、检查钻孔,和数以百万计的各种勘测试验数据,以及洞穴探险、示踪、地下水“三场”特征、井中透视、地质雷达、CT 图像、原位声波、弹模试验等多种方法手段,研究了厚 500m 多的个旧组灰岩,揭露和反映出的地下岩溶现象亦十分复杂和强烈。

① 各类平硐揭露的稍大溶蚀裂隙共有 2199 条,平均 0.38~0.58m 有一条裂隙,且倾角较陡。其中倾角 > 50° 的裂隙占总数的 78%,又以北西 270°~350°、近南北 350°~20° 和北东东 40°~90° 方向的裂隙较多,分别占总数的 44%、23%、25%。

② 各类勘探钻孔揭露的溶洞共有 116 个,溶洞累计总高 703.90m,钻孔线岩溶率 6.69%。

③ 三层灌浆廊道(图 2)开挖中共揭露溶洞 37 个,其中最大的是 KM7 溶洞。溶洞发育与断裂有关。

④ 灌浆检查孔揭露的溶洞共有 165 个,溶洞累计总高度 935.0m,钻孔线岩溶率 4.63%。

⑤ 堵头工程揭露的岩溶洞穴:封堵地下河岩溶管道的堵头(位于图 1 倒虹吸管北端与灌浆帷幕线相交处)工程,原设计在Ⅲ号暗河(位于图 1 的西侧,其以东依次为Ⅱ、Ⅰ号暗河)渠流段末端大厅中,由于 KM7、KM8 溶洞群的发现,帷幕线的更改,堵头工程下移至地下河“倒虹吸管段”入口下游 10~30m 处,正好位于防渗墙西端下方。开挖后发现,地下河在此段呈单一的岩溶管道,其断面成锁孔状,洞顶高程 1328.9m,洞底高程 1295.4m,洞高 33.5m,洞宽 1.6~9.5m,地下水位 1319.0m。全洞大部分为砂卵砾石充填,洞顶及侧壁有钟乳石和钙华堆积,可见洞顶钟乳石最低置于枯水位下 4~6m,壁钙华下界大约在高程 1302.5m,反映侵蚀基面有过强烈振荡。

⑥ KM7、KM8 溶洞及北部溶塌体:KM7、KM8 溶洞位于五里冲盲谷与龙宝坡洼地间略偏西的山体

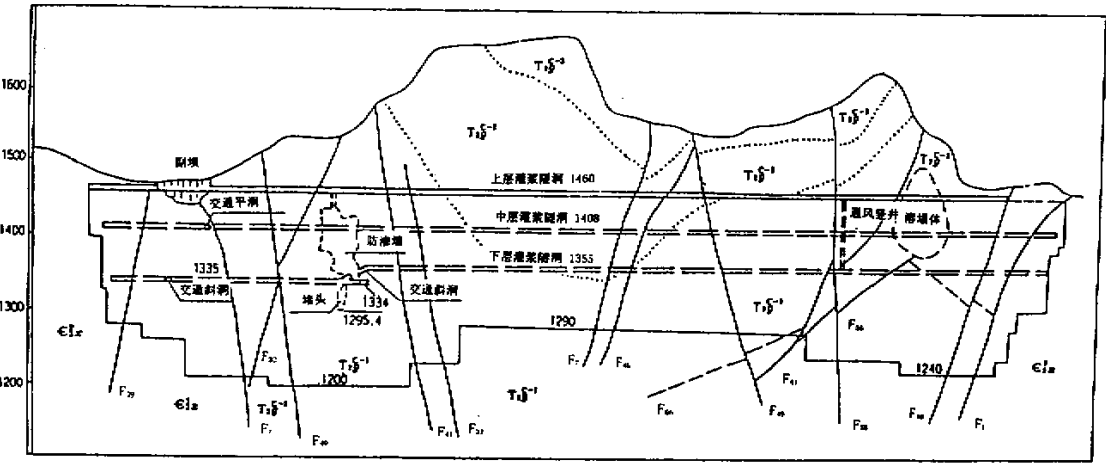


图 2 五里冲水库防渗帷幕纵剖面示意图

Fig.2 Sketch longitudinal-profile showing leakage proof and curtain-style grouting situation in Wulichong reservoir

内,是在中层灌浆廊道开挖初期相继发现的。两洞平面上呈“T”字型分布,相距 30~40m,长 90~100m,宽 20~40m,高 36~60m(净空高 20~36m),均为半充填特大型洞厅,容积达 10~13 万 m³,洞底偏向西或北,高出暗河 40~50m,为早期五里冲地下河系中之岩溶大厅。在两大洞厅间,工程揭露还有 D8K1、D8K2、Z5K1 等长度大于 30m,宽数米至十多米的廊道式底洞相通并与地表个别溶洞相接。

北部溶塌体是在帷幕北段中层灌浆廊道开挖中发现的,其上部主要为块石粘土、下部多为粘土砂砾卵石充填的松散岩体,其范围北东方向长约 70m,北西方向大于 80m,高约 100m,平面成倒犁型,北东向横断面呈下大上小的纺锤形,分布高程 1380m~1480m,地表无明显溶洞、竖井与之相连。溶塌体无净空洞腔,均为崩塌(溶塌)块石粘土砂砾堆积。

这一溶塌体的发育及其河流相外源水带入的砂卵石,说明早期这里有一规模巨大的流入型洞穴,是地表水向地下岩溶空间集中转移的强岩溶化部位。连同附近揭露的岩溶形迹,还反映出,它们可能正处于斜坡变形体中,或者是斜坡变形和强烈岩溶作用的综合产物。

3.1.3 灌浆工程反映的地下岩溶现象

五里冲水库主要是通过高压灌浆技术,充填处理个旧组灰岩中的洞(厅)、管、缝、隙、孔等岩溶空间,达到加固稳定、防渗蓄水的要求。灌浆资料反映的岩溶现象亦是十分复杂、强烈和极不均一的。但是,如何利用灌浆资料评价岩溶问题?我们试利用灌浆钻孔

的灌段水泥注入量的多少,折算成水泥结石的体积(约折合 0.67m³/t),以大致反映地层岩溶空间的大小,来评价其岩溶发育程度(表 1)。

表 1 灌段水泥注入量分级与岩溶发育程度划分表

Tab.1 Grading to cement injecting amounts in grouting section and karst developing degree

灌段水泥注入量 (t)	水泥结石容 积(m ³)	岩溶空间 体积特征	岩溶发育 程度分级
< 1	< 0.67	溶孔、细小裂隙	不发育或微弱发育
1~5	0.67~3.35	溶隙及小溶洞	弱发育
5~10	3.35~6.67	小及中等溶洞	较发育
10~20	6.67~13.34	中等溶洞	中等发育
20~50	13.34~33.5	中及大溶洞	较强发育
> 50	> 33.5	大溶洞	强发育

五里冲水库 3000 多个灌浆孔,近 5 万个灌段,反映出虽然有 93.52% 的灌段水泥注入量 < 1t,指示岩溶空间介质主要呈一些细小裂隙或连通不好的孔隙分布,岩溶不发育或微弱发育,但仍有 6.48% 近 3100 个灌段水泥注入量 > 1t(表 2),有 724 灌段水泥注入量 > 10t,有 67 灌段水泥注入量 > 50t,表明其间有不少溶隙、大小不一的溶洞、岩溶管道等分布,整体上岩溶呈强烈发育和极不均一的状态。

按帷幕长度每 10m 一段计算的单宽耗浆量(C),各层廊道范围内,其值变化较大(表 3),从不足 1t/m 至 213t/m,但大多数段落 < 5t/m, > 10t/m 的

表 2 灌段水泥注入量超级率统计表

Tab.2 Statistics table on the surpassing rates of cement injecting amounts in grouting sections

廊道层次	灌段总数	注 入 量 超 级 率 % (t)						灌段最大 注入量 (t)
		> 1	> 5	> 10	> 20	> 50	> 100	
上层	10631	1082	537	377	181	40	12	568.8
	超级率 %	10.18	5.05	3.55	1.70	0.38	0.11	
中层	16393	1025	357	207	92	22	7	430.3
	超级率 %	6.25	2.18	1.26	0.56	0.13	0.04	
下层	20779	992	275	140	45	5		86.2
	超级率 %	4.77	1.32	1.67	0.22	0.02		
合计	47803	3099	1169	724	318	67	19	
	超级率 %	6.48	2.45	1.51	0.67	0.14	0.04	

注 超级率(%)= 大于某一水泥注入量等级的灌段数/灌段总数

表 3 帷幕单宽(每 10m 一段)耗浆量 > 10t/m 的段数超级率统计表

Tab.3 Statistics table on the sections that is more than 10t/m in using cement per unit(10m a section)

廊道层次	计算起 止桩号	段数	超 级 率 % (t/m)					最大值 (t/m)
			> 10	> 20	> 30	> 50	> 100	
上层	60 ~ 1030	97	47	21	11	3	2	213
		超级率 %	48.5	21.6	13.3	3.1	2.1	
中层	10 ~ 1260	125	26	12	7	2	2	113
		超级率 %	20.8	9.6	5.6	1.6	1.6	
下层	10 ~ 1250	124	15	7	1	0	0	31
		超级率 %	12.1	5.6	0.8	0	0	
合计	346	88	40	19	5	4		
		超级率 %	25.4	11.6	5.5	1.4	1.2	

段落仅有 88 段 , > 20t/m 的有 40 段 , > 50t/m 的有 5 段。以中上层廊道范围内大耗浆段落较多 , 最大耗浆段出现在上层廊道范围内。从表 2、表 3 我们可以看出 :

①下层廊道由于主要分布于当地侵蚀基准面以下 , 受地面风化及卸荷作用影响小 , 大耗浆段分布较少 , 水泥注入量 > 10t 的灌段只 140 段 , > 50t 灌段只 5 段 , 帷幕单宽耗浆量一般 < 5t/m , > 10t/m 的也只 15 个段落。这些大耗浆段主要分布在帷幕南段堵头区及以东和北段 F₅₆ 断层(图 2)下盘区域 , 帷幕单宽耗浆量最大值也出现在 F₅₆ 断层下盘范围内。说明下层廊道范围内 , 岩溶一般发育较弱 , 仅局部地段岩溶相对发育 , 个别点上有较大溶洞分布。

②中层廊道范围内 , 虽然洞体大多处于山体内部 , 受边坡卸荷影响较小 , 但仍发现有不少溶洞 , 廊道开挖中共见溶洞 15 个 , 并有 KM7、D8K1、D8K2 等溶洞 , 大耗浆段分布远比下层廊道的多 , 灌段水泥注入量 > 10t 的有 207 段 , 并有 22 段大于 50t , 最大耗浆段达 430.3t , 帷幕单宽耗浆量 > 10t/m 的 26 个段落 , 并

有 > 100t/m 的段落出现。这些大耗浆段主要出现在南段防渗墙两侧及 F₁ ~ F₄₀ 断层间和北段溶塌体地段 , 帷幕中段个别断裂附近也有大耗浆段分布。说明中层廊道范围内岩溶要比下层廊道发育得多 , 局部有溶洞、岩溶管道发育。

③上层廊道范围内 , 大耗浆段比中下层廊道要多 , 灌段水泥注入量 > 10t 的有 377 段 , > 50t 的 40 段 , 并有 12 段 > 100t , 最大耗浆段高达 568.8t , 帷幕单宽耗浆量 > 10t/m 的有 47 个段落 , > 100t/m 的有 2 个段落。这些大耗段主要分布于廊道南北两端进出口地段及南段防渗墙地段和北段溶塌体以西 , 帷幕中段个别断裂附近也有大耗浆段出现。这与上层廊道整体更接近地表 , 尤其两端受岸边卸荷影响较大有关。实际开挖中 , 就见有溶洞 13 个 , 并有 Z5K - 1 等较大溶洞分布。说明上层廊道范围岩溶最为发育 , 宽大溶隙较多 , 并有一些大小不等的溶洞分布。

3.2 五里冲地下河管道系统

该管道系统北起五里冲岩溶盲谷 , 南至小窝子及座坡泉口 , 直线长 9 ~ 11km , 高差 150 ~ 220m , 其间串

联有多个洼地落水洞,上游段有分支,已探明的五里冲洞、龙宝洞、期白邑洞、岩峰洞等洞穴总长度3224m,占管洞总长度的24.4%。从纵剖面上看,其洞穴管道系统多呈双层单管多支的洞-厅-管结构。进口及上游段,由于输入能量及物质较强,厅堂较大,管道系统发育与地表多个溶洞、洼地联接,双层结构明显。下游出口段,由于受排泄基面下移变迁影响,洞厅小、管道系统发育差,排泄口以泉形式溢出。平均坡降14‰~17‰,比相邻的新现河上游的10.5‰为陡。

从五里冲水库工程来讲,以其进口及上游段最为重要,也是水库工程集中分布地段,并有Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号暗河管道及KM7、KM8等溶洞群分布。

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号暗河都曾为五里冲地下河的入口组成部分,洞口处于盲谷南端,Ⅰ、Ⅱ号暗河已大部分淤堵,逐渐消亡,仅Ⅲ号暗河为现今五里冲地下河的主流管道。其洞口进口高程1352m,北西向进洞后,转向南西发育,呈单道式洞(厅)-管展布,受构造韵律影响,宽大的洞厅与窄长的管道相间分布。前594m段为地下河渠流段,洞高15~35m,洞宽3~20m,末端为一大厅堂(高25~36m,宽16~20m),段内多钟乳石类沉积,洞底有外源水带入的、直径4~25cm的砂砾卵石堆积。暗河枯季流量 $0.2\text{m}^3/\text{s}$,流速 $0.32\text{m}/\text{s}$,在213m及533m处与Ⅱ号暗河相接,平均坡降55‰。暗河水位低于西侧地下水位,高于东侧地下水位呈半悬挂状态。说明还处于不稳定的调整时期。Ⅲ号暗河在594m处没入地下倒虹吸管,至龙宝洞的始端复出,此段进口高程1318m,出口高程1313m,洞呈锁孔状,此段北端上方东有KM7、南有KM8洞等大型洞穴群,暗河在龙宝洞内渠流一段后,再次潜入地下流出龙宝洞(图1)。

自龙宝洞下泄后,沿途向南沿 T_2g/ϵ_{3x} 界面发育,接纳由落水洞、洼地等汇集的水补给,最后在标高1200m及1130m的小窝子及座坡以泉溢出,枯季流量 $0.15\text{m}^3/\text{s}$ 和 $0.20\text{m}^3/\text{s}$ 。

五里冲地下河管道系统,绝大部分发育于 T_2g 质纯厚层灰岩中,主要受南北向区域性断裂控制,大的溶洞、厅堂又与北西向或北东向断裂关系密切。

3.3 岩溶发育的基本规律

根据地面调查和大量勘探试验和灌浆资料,五里冲水库枢纽区岩溶发育有如下基本规律和特征:

3.3.1 岩溶发育受岩性及构造控制明显

在枢纽区的较大溶洞、地下河管道等几乎都发育于 $T_2^{-1}g$ 厚层灰岩中,该层灰岩CaO含量一段在55.2%~55.7%,MgO含量只0.2%~0.5%,SiO₂含量

不足1%,其纯度高,加之层厚,连续性好,岩溶异常发育。而 $T_2^{-2}g$ 薄层含泥质灰岩,其CaO含量较低,CaO/MgO比值较小,SiO₂含量可达10.2%,纯度低,有泥质,致使溶洞、岩溶不发育。

五里冲的地下河管道、洞穴总体走向受区域性南北向断裂控制,而大的溶洞、厅堂多与北西向、北东向等两组断裂的交会部位有关,地下河管道也有跟踪北西、北东向断裂发育的现象。而且大的耗浆孔段多出现在断裂带上或其影响带上,说明岩溶的发育受断裂构造控制明显。

3.3.2 岩溶的发育极不均一

由于构造、岩性、水动力条件等的控制,岩溶发育只在其有利的部位发育,普遍具有不均一性的特点。五里冲水库区资料反映,平硌中数十至百米距离,往往只有细小裂隙分布,溶洞只在局部地方发育,灌浆资料也反映,近50000个灌浆段中,86.77%为单耗值小于 $50\text{kg}/\text{m}$,大于 $50\text{kg}/\text{m}$ 的灌段只占13.23%,而大于 $1000\text{kg}/\text{m}$ 的灌段只有1356段,不足总数的3%。全区平均岩溶率为4.6%~6.7%。溶蚀空隙率(可充填部分)3.16%。

3.3.3 与五里冲地下河的形成紧密相关

地下水的活动是岩溶发育诸因素中最重要最积极的因素,地下水往往具有最强的能量输入输出功能和物质交换能力,强岩溶发育地方,不是在地下水(河)的补给入口部位,就是在它的径流带上或排泄地段。五里冲水库枢纽区正好处于五里冲地下河的进口地段,所以这里发育了Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号暗河管道系统,并有KM7、KM8等溶洞群,地表各种溶洞也达数十个之多,就是北部溶塌体反映的地下大溶洞,也是一个局部的地表水转向地下的集中部位。灌浆资料等反映的地下较大的岩溶空间,也是在五里冲地下河的发展演化过程中不断形成发展起来的。

3.3.4 岩溶及强岩溶发育有由上向下递减的现象,而无明显的分层发育的规律

据118个揭露溶洞的钻孔统计,高程1310~1460m范围内岩溶较发育,而以1390~1410m段岩溶最发育,出现的溶洞个数及累高数都最大(图3),灌浆耗浆量资料统计,从上层廊道范围内至下层廊道范围内,灌浆的C值,都有从上向下递减的规律。

3.3.5 现今地下河系统较为年青,形成时期较晚

五里冲地区作为云南高原的组成部分,它同样经历了自燕山运动以来的重大地质事件,包括地壳变形、气候与生物演化及水文网的变迁。其岩溶发育可追溯的时间很早,一般划分的山原期、台原期(石林

期)河谷期(南盘江期)的岩溶,这里都有反映。但是,受区域环境影响,更新世以来,岩溶发育才进入一

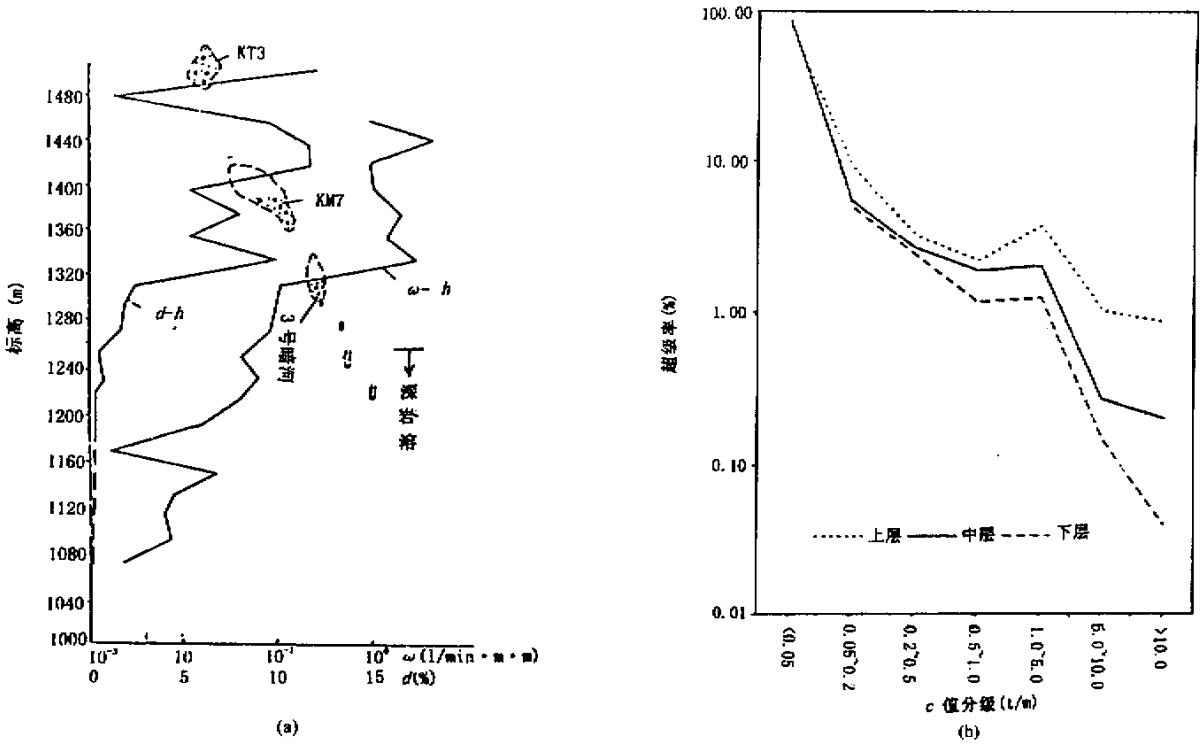


图 3 枢纽区岩溶的垂向分布特征

(a:单位吸水量(ω)线岩溶率(a)与高程关系曲线;b:帷幕灌浆孔灌段C值超率曲线)

Fig.3 Map showing the vertical distribution of karst in Wulichong reservoir pivot

(a: Relationship among the rate of rock absorption, rate of karstification and altitude of bore hole;
b: Curves showing c-value surpassing rates of curtain-style grouting sections)

个全新的时期,一方面是受区域性青藏高原抬升影响,孟加拉湾北上的温暖大气环流形势,温湿的气候条件,有利于岩溶发育,促进区内岩溶全面转入地下;一方面是原有断裂复活,红河溯源袭夺,排泄基面迅速下降,山地河谷型岩溶逐渐形成,加之非岩溶区外源水的汇入,更有利于岩溶发育。在中更新世中后期,绿水河已由一冲沟发展成一初具规模的地表—地下水系,其上游已溯源到五里冲地区,使五里冲地下管道系统迅速扩容贯通,现今已测到的洞穴沉积的半胶结的紫红色粘土岩最老也只20~40万年。区内的如白磷洞、龙宝洞、KM7、KM8等上层洞系及北部的溶塌体可能都形成于此时期,并成为五里冲地下河较早的主要吸水点,岩溶发育也开始由地表无序状态的消水,转入有序的以地下水系形成的地下岩溶发育为主的时期。晚更新世以来,由于区域地壳的继续抬升,速率加快,高原山地温湿气候的典型化和绿水河进一步下切,第一九股水排泄基面下移,使五里冲地下河的发育进入了最盛期,一方面是岩溶管道系统扩展庞大,主要排泄基面早期的小窝子下移3km至座坡泉

群,高差下降近100m;一方面是进口地段管道系统复杂化,地表陡崖峭壁扩展增高,I、II、III号暗河相继形成,上层洞系脱离地下水面,并逐渐发展成了现在的下层洞系。堵头区的附近排水管洞下移了约100m,出现了较为单一的岩溶管道,并在洞穴中形成了大量的溶蚀或崩积、冲洪积堆积物。

五里冲地下河入口段,洼地深大,溶洞分布高程高低不一,陡岩峭壁高达100~200m多,地表消水集中,现代沉积物发育,岩溶管道淤塞摆动迁移,具有典型的山地流入型洞穴的地表地下岩溶发育特征。在此类地区修建工程,往往具有很强的不可预见性,工程的处理也复杂困难。五里冲水库能在此建库成功,给岩溶地区的工程建设,尤其是地下工程建设,提供了很好的经验。

3.3.6 溶蚀速度与强度

根据野外测试及计算,五里冲水库枢纽区碳酸盐岩的溶蚀速度为 $93.504\text{m}^3/\text{km}^2\cdot\text{a}$,比云南蒙自南洞、罗平、路南石林的计算结果(分别为 $43.18\text{m}^3/\text{km}^2\cdot\text{a}$ 、 $51.53\text{m}^3/\text{km}^2\cdot\text{a}$ 、 $31.7\text{m}^3/\text{km}^2\cdot\text{a}$)要大,岩面溶蚀速度

总体亦较大,达 $2.0463\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{a}$,并具有:①不同地貌位置,同一种岩类一般表现为山顶>洼地边缘>斜坡地带;②地表浅部>地面>地下水>溶洞充填物;③泥质灰岩>白云岩、白云质灰岩>灰岩。说明五里冲水库枢纽区碳酸盐岩溶蚀速度在云南高原处于较高水平,岩溶化过程仍在发展中,岩溶作用强度较强。

3.3.7 关于深岩溶问题

我们把岩溶水水平循环带以下发育的岩溶称为深岩溶。由于五里冲地区特定的自然地理地质环境,水库枢纽区有着较好深岩溶发育条件,深岩溶问题是存在的,其性质应属于断裂—河谷型深岩溶。但是大量资料显示,高程1210m以下未见溶洞,1200~1250m高程揭露的深岩溶,溶蚀裂隙约占83.34%,溶孔和溶洞分别为12.66%和4.02%,且一半被全充填,半充填和未充填的各占1/4。最深的古岩溶下限为高程1183.82m,为紫红色钙质泥岩全充填。加之岩体透水性有随深度增加而递减的规律,因此,我们说,水库枢纽区虽然有深岩溶问题,但下界深度有限,经处理后,可能有少量小裂隙性渗漏,但不影响水库运营。

4 水库的堵洞和防渗工程

五里冲水库是在岩溶强烈发育地区,靠封堵地下河管道溶洞和利用高压灌浆技术形成的防渗帷幕蓄水的无大坝中型水库。洞管能否堵得牢、帷幕是否封得严、包得住,是水库成败的关键。

4.1 利用岩溶管道“厅堂与窄巷相间发育规律”,堵头工程位置选择适中,堵体牢固可靠

五里冲地下河发育较为年青,现今地下河以单管道为主;“窄巷与厅堂相间分布”的特点明显。在堵头的位置选择中,从初设时的岩溶大厅下移40m,置于Ⅲ号暗河进入倒虹吸管入口下游10~30m处,该地正处于地下河主管道变窄处。经过全面开挖后发现,此段地下河呈现单一的岩溶管道,虽然充填物较厚,但岩溶管道断面清晰,呈上宽下窄的锁孔状,并正好在防渗墙西端下方便于连结。经清基后,分层灌浇混凝土,形成长13~15m、宽2~10m、高33.5m,体积 4031m^3 的楔状混凝土嵌入地下河管道中,并在其中安装放空钢管闸门和消能设施,成功的堵截了地下河,现堵头已承受了约160m的水头压力,仍稳固牢靠。

4.2 充分利用有利地质条件,帷幕布置合理,底界高低错落有序

作为岩溶水库的重要组成部分的防渗帷幕,一定

要能充分利用有利的地质条件,扬长避短,趋利避害,并且要包得住、封得严、造价低。五里冲水库的防渗帷幕工程,线路上呈“L”形分布,南北两端插入相对隔水的 C_{3x} 砂板岩地层中,把岩溶发育强烈、强透水的个旧组灰岩全部包围起来。在帷幕通过南北两段岩溶最发育的地下水强径流带及现代Ⅲ号暗河时,帷幕线路近东西向分布,近于垂直的以最短线路通过,从而缩短了线路长度,降低了造价。帷幕中段约500m长线路,近南北向摆布,它充分利用了 $\text{T}_2^{c-2}g$ 段岩溶发育相对较弱,地下水位较高的特点,使帷幕线基本平行于 $\text{T}^{c-2}g$ 地层并在其中分布,靠近 $\text{T}_2^{c-3}g$ 岩层。这样,一方面可使帷幕工程变得较为简单,一方面可提高帷幕底界,减少工程量,降低造价,施工也较容易。为了便于帷幕灌浆施工,充分利用有利的地形地质条件,沿帷幕线设计开挖了三层灌浆廊道,每层长约1300m(参见图2)。

五里冲水库的防渗帷幕是在岩溶地层中设置的一悬挂式帷幕,即帷幕底界未能插入隔水岩层,仍在岩溶地层中,因此帷幕底界的确定十分重要。工程在早期就利用多种手段、方法,研究了区内岩溶发育特征和下限,并结合河谷型深岩溶发育特点,确定了帷幕的底界高程在南北两段地下水位低槽区为1200m和1240m,中段地质条件较好地段为1290m,南北两端插入 C_{3x} 砂板岩地层段,帷幕底界标高为1340~1390m,使整个帷幕底界标高,依客观地质条件而定,扬长避短,高低错落。从而不单使帷幕包得住、封得严,还极大地减少了工作量,降低了造价,从蓄水至今看来,帷幕是成功的。

4.3 岩溶渗漏的克星——高压灌浆技术建造帷幕,先进可靠便捷

岩溶地区修建水库工程,渗漏问题往往成为工程成败的核心,尤其中小型水库,防止岩溶渗漏更是水库成败的关键。五里冲水库,几十年来不能建设,主要也因难以解决其岩溶渗漏问题。上世纪七十年代,我国在一些大型水利工程上引进高压灌浆技术,先后成功地解决了一些岩溶渗漏问题,这也为五里冲水库修建创造了良好的条件。

根据五里冲水库的岩溶发育特征和渗漏条件,把以高压灌浆技术为核心的防渗帷幕作为建库方案,在经过灌浆试验取得灌浆压力、孔距、排距、压水、灌浆工艺等有关参数、具体了解地层的可灌性及预期效果后,在已建成的廊道内,由下层→中层→上层分层采用4~6MPa压力,小口径钻进,孔口封闭,自上而下分段钻灌,不待凝,灌前压水,孔内循环、集中供浆的

高压灌浆技术 ,成功地处理了岩溶地层的强渗漏问题 ,形成了共三层总高 260m ,长 1330m ,面积 26.2 万 m² 的防渗帷幕。这种高压灌浆技术由于有超乎寻常的压力 ,水泥浆对裂隙、溶洞等不单有较强的充填作用 ,还有较强的穿透性能、压密作用和扩散能力 ,在营造帷幕和加固岩层方面 ,可以起到实现防渗和结构加固的双重目的 ,从而达到较好效果。在一些软弱地层、破碎岩体 ,还可先作封闭灌浆、固结灌浆、再作高压灌浆。灌浆中根据浆液的流失情况 ,还可采取慢升压、限流、间歇、加速凝剂 ,调整浆液浓度等措施。五里冲水库 ,先后打了 3118 个钻孔 ,进尺 21.6 万 m ,注入水泥 3.3 万 t ,有效地解决了强岩溶地层的渗漏问题。由于它工艺较简单 ,易于操作 ,方便、简捷、可靠 ,效果较好 ,为岩溶区防渗工程提供了一种好方法 ,成为了岩溶渗漏问题的有效克星。

4.4 决策审慎 ,采用超高超薄防渗墙通过溶洞间破碎岩体

工程初期 ,在中层廊道开挖中 ,先后遇 KM7、KM8 特大型溶洞 ,其体积都在 10 万 m³ 以上 ,KM7 溶洞正处于帷幕线上 ,KM7 与 KM8 间相距 30 ~ 40m 为一残留岩体。经进一步勘探 ,其间尚有 D8K1、D8K2 及上部的 Z5K-1 溶洞 ,共同组成一个复杂的洞穴群。这些溶洞的存在 ,极大地影响着帷幕线的摆布 ,威胁着整个工程的成败。如何处理好如此巨大的岩溶洞穴系统 ,达到防渗、稳定安全的目的 ,不仅国内外少有成功先例 ,技术上要求创新 ,安全施工组织上也有许多问题需要解决。经补充勘探 ,最后调整帷幕走向 ,利用 KM7 与 KM7 之间残留岩体设置高 105m ,厚 2 ~ 2.5m ,宽 50m 的超高超薄钢筋混凝土防渗墙起防渗作用 ,左右与帷幕相连 ,下部与堵头相结 ,在墙后利用 KM7 与 KM8 间残留岩体及对 KM8 溶洞北端进行加固处理 ,形成的‘岩石拱’支撑墙体承受的强大渗透水头压力(图 4)。施工中限于条件 ,主要靠人力开挖回填 ,为确保安全 ,采取增加工作面 ,上下多层块交错 ,平行作业的立体施工方法 ,共开挖土石

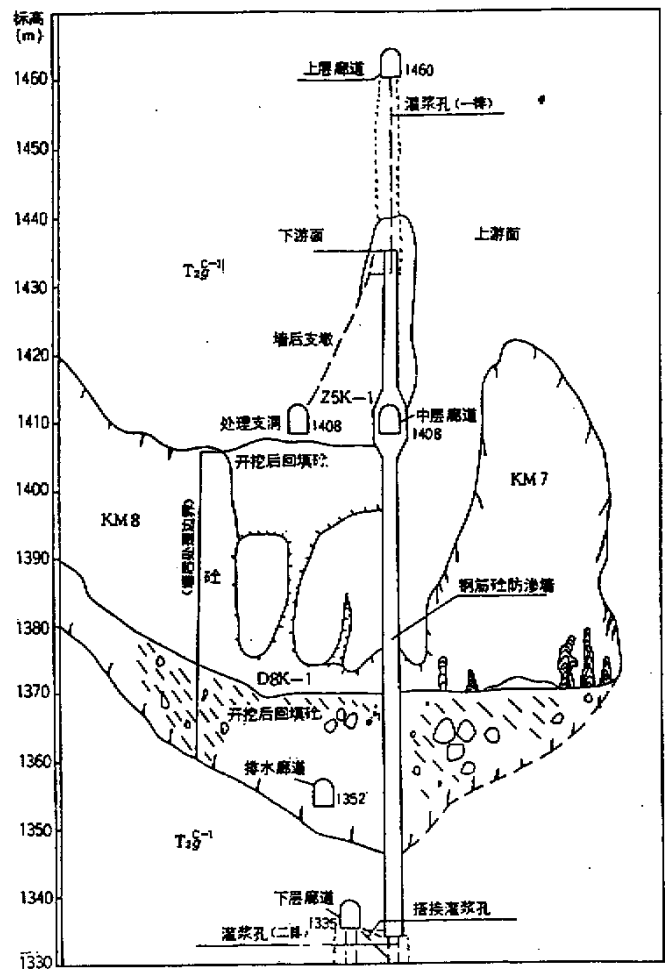


图 4 五里冲水库防渗帷幕墙横剖面示意图

方 4.2 万 m^3 多,浇筑混凝土 5.0 万 m^3 多,增加投资 1678 万元,历时三年完成了这一复杂艰巨的溶洞处理工程。防渗墙的建成不单保证了水库按时蓄水,也为水利工程上大型溶洞的处理创造了一个成功的范例。工程实践表明,整个防渗墙工程地质条件揭露较为充分,决策审慎,有所创新,位置选择适中,方案适合特定的地质条件。经蓄水几年的检验,能满足防渗及稳定要求。

4.5 加密高压灌浆技术,成功处理特殊复杂的溶塌堆积体

继帷幕南段发现 KM7、KM8 等大型溶洞后,在帷幕北段的中层及上层廊道中,又发现了上部以巨大块石为主,其间充填砂砾粘土,下部以粘土、砂砾为主,夹灰岩碎块石及冲洪积物的结构复杂、体内无空洞的

溶塌混合堆积体,给帷幕的稳定和防渗带来巨大困难。后经补充勘探证实,它是下部受 F_{56} 断层控制,上部未出露地表,库岸山坡有一破壳,是在原来巨大溶洞基础上经多次充填、崩塌堆积形成,在帷幕线上长 30~70m 面积 3200 m^2 ,体积在 10 万 m^3 以上。经过反复试验,决定用加密高压灌浆的方法进行处理,上层廊道内灌浆由原单排孔增加为四排孔,孔深由原 54m 增加到 75~92m。中层廊道内灌浆孔由原双排孔增加为五排孔(图 5)并采取先封闭固结,逐渐加压,终止压力控制在 4MPa。对特大耗浆段还采用了限流、待凝、加速凝剂、复灌、控压、冲砂等综合措施,历时 2 年,共注入水泥(含粉煤灰)近 4000t,增加投资 1200 万元,终于使这一段软弱复杂岩体达到了工程设计要求。现经蓄水考验,仍处于安全稳定中。

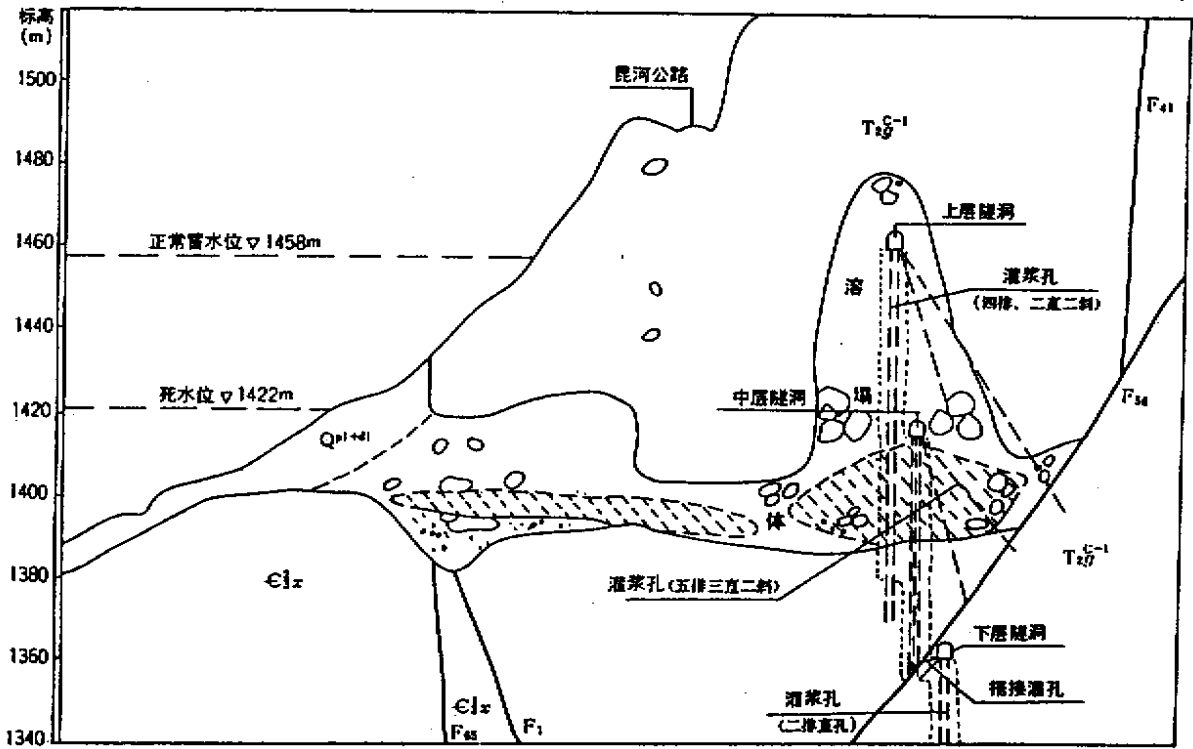


图 5 溶塌体帷幕灌浆示意图

Fig.5 Sketch map showing curtain-style grouting to the karst corrosive collapsing bodies

该文是在原研究报告基础上参阅有关资料写成,参加科研工作的还有王珽、吴美尧、闫志为及梁彬同志。

参考文献

[1] 袁道先,蔡桂鸿.岩溶环境学[M].重庆出版社,1998.
[2] 袁道先.中国岩溶学[M].地质出版社,1994.
[3] 王佳武.灰色关联度在渭北东部高氟岩溶水文地质分析中的应用[J].中国岩溶,1993(3).

[4] 邹成杰,等.水利水电岩溶工程地质[M].水利水电出版社,1994.
[5] 刘再华.贵州乌江渡水电站灌浆帷幕老化问题的研究[M].广西师范大学出版社,1996.
[6] 康彦仁.岩溶地区建库的先例,溶洞工程处理的典范[J].中国岩溶,1997(2).
[7] 何宇彬,邹成杰.关于喀斯特溶洞发育深度问题[J].中国岩溶,1997(2).
[8] 梁彬.王里冲水库枢纽区防渗帷幕渗漏问题研究中水文地球化学的应用[J].中国岩溶,1997(3).

