

刘家峡水电站大坝地基渗流控制

徐曾衍 何遂信 傅冰骏

提 要

刘家峡水电站是黄河上大型水利枢纽,坝高 147 米,装机 122.5 万千瓦,年平均发电量 57 亿度。河床主坝为混凝土重力坝,修建在坚硬的弱透水性的云母石英片岩上。刘家峡河谷狭窄,河床左侧有一组顺河的张性断层,左岸岩层产状倾向河床和下游,有多层构造挤压破碎带,渗透性不均一,绕坝渗流量大。为此大坝地基渗流控制采用了堵排结合,以排为主的处理措施,对断层也进行了专门处理。初期运行观测资料表明,大坝地基渗流控制措施满足了设计要求。文中对河床坝基排水、峡谷河床绕坝渗流,以及坝前淤积泥沙对扬压力的影响等有关问题也进行了讨论。

一、工程概况

黄河是我国第二条大河,有丰富的水利资源。遵照毛主席“要把黄河的事情办好”的指示,为了根治黄河水害,开发黄河水利,在黄河上游兴建了一座大型水利枢纽工程——刘家峡水电站。它位于甘肃省兰州西南,距离兰州约 50 公里的峡谷中,控制流域面积为 173,000 平方公里,库容 57 亿立方米,装机容量 122.5 万千瓦,年发电量 57 亿度。该工程以发电为主,兼有防洪、灌溉、防凌、养殖以及工业和城市用水等综合效益。

刘家峡水电站枢纽工程包括大坝、泄水建筑物、电站厂房及其他附属建筑物(图 1)。大坝由河床主坝、左、右岸混凝土副坝、溢洪道与黄土副坝组成,全长 840 米。主坝为混凝土重力坝,最大坝高 147 米,坝长 204 米,坝顶宽 16 米(照片 1)。黄土副坝最大坝高 45 米,坝顶长 216 米,其右端插入砂砾石黄土台地内(照片 2)。

泄水建筑物由溢洪道、泄洪洞、泄水道及排沙洞组成,总泄量为 7,500 秒立方米。泄水道与排沙洞配合运用可控制坝前泥沙淤积高程,减轻泥沙对水轮机磨损,及水草对拦污栅的堵塞。

电站厂房为半地下半开敞式混合布置,装有五台机组,最大单机容量 30 万千瓦。输电电压为 220 千伏和 330 千伏,第一台机组于 1969 年 4 月发电。

刘家峡水电站于 1974 年底全部建成,促进了陕、甘、青三省的工农业生产,为加速改变我国西北地区的干旱面貌作出了贡献。在工程建设中也积累了一定的经验。本文仅就其中问题之一,主坝地基渗流控制问题予以叙述和讨论。

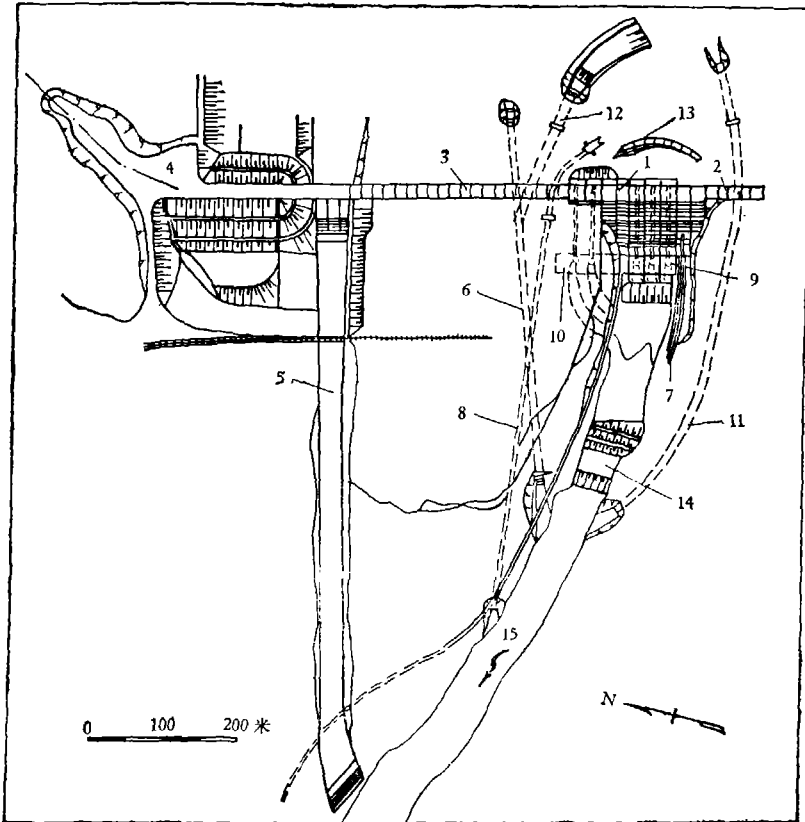


图1 刘家峡水电站总平面布置图

1.主坝, 2.左岸混凝土副坝, 3.右岸混凝土副坝, 4.黄土副坝, 5.溢洪道, 6.泄洪洞, 7.泄水道, 8.排沙洞, 9.坝后厂房, 10.地下厂房, 11.左岸导流隧洞, 12.右岸导流隧洞, 13.上游拱围堰, 14.下游土石围堰, 15.黄河

二、主坝地基渗流控制

1. 地质条件

刘家峡河谷狭窄, 岸坡陡峻。基岩主要为前震旦系云母石英片岩, 夹有少量角闪片岩, 其中也穿插有少量花岗岩脉和煌斑岩墙。基岩岩性坚硬, 抗压强度高, 是修建混凝土高坝的良好坝址。

坝址岩体的渗流特性随岩层产状、断裂分布及其充填物性质而不同。由于岩层产状与河流斜交, 断裂分布各异(参看图2, 3), 因此坝基各部分渗流也各不相同。现按其渗流特性划分为河床、左和右坝肩三部分分别叙述于后。

(1) 河床地基透水性小, 一般渗透系数为 $6 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-6}$ 厘米/秒, 相对不透水地段(单位吸水量 $\omega < 0.01$ 公升/分)约占试验段总长度的 70%, 系弱透水性地基。由于河床左侧, 有一组顺河张性断层, 不仅倾角较陡, 延伸较长, 规模也较大, 其中 F_{69} 贯穿上下游, 其破碎带宽度一般在 2 米以上, 主要由构造碎屑、角砾岩及微量粘土组成, 断层影响带宽度约 3—4 米, 由构造块状岩组成。 F_{69} 与其相邻的 F_{154} , F_{155} , F_{175} 和 F_{176} 等张性断层汇合处, 影响带的宽度最大

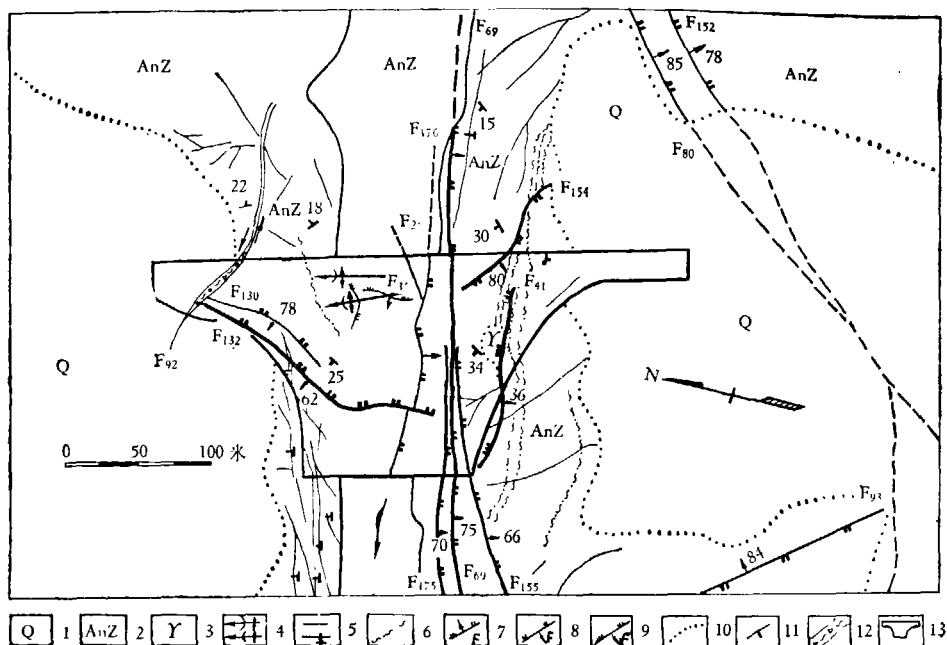


图 2 刘家峡水电站主坝坝基断裂分布图

1. 黄土, 2. 云母石英片岩, 3. 花岗岩脉, 4. 背斜轴, 向斜轴及倾向, 5. 构造裂隙及层面裂隙, 6. 构造挤压破碎带, 7. 正断层, 8. 逆断层, 9. 逆掩断层, 10. 岩层分界线, 11. 岩层产状, 12. 断层破碎带, 13. 建筑物轮廓线

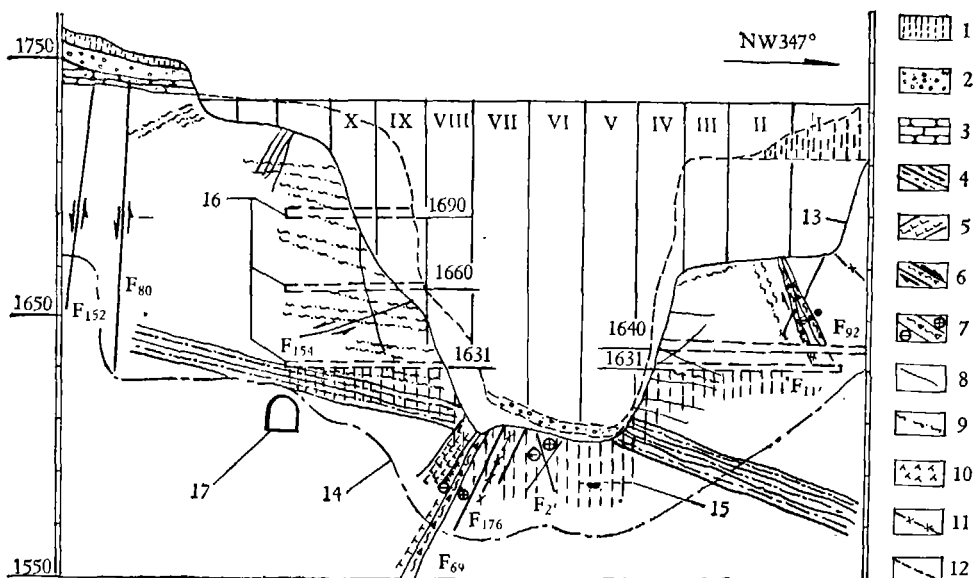


图 3 刘家峡水电站主坝坝基处理纵剖面图

1. 黄土, 2. 砂砾石, 3. 红砂岩, 4. 云母石英片岩, 5. 煌斑岩墙, 6. 正断层及其破碎带, 7. 平推断层及其破碎带, 8. 构造裂隙, 9. 构造挤压破碎带, 10. 构造影响带, 11. 微风化及中等风化分界线, 12. 原地线, 13. 开挖线, 14. 高压灌浆帷幕线, 15. 排水孔幕线, 16. 排水洞, 17. 左岸导流隧洞

达 10 多米。根据实测,断层破碎带的 ω 值仅为 0.0019—0.0056 公升/分,但断层影响带的 ω 值就高达 1.65—5.74 公升/分。由此可见,河床岩体渗流特性很不一致。河床岩基严重透水地段 ($\omega > 0.1$ 公升/分) 约占试验段总长度的 5%。此外,在个别钻孔出现承压水,约在河床岩面以下 23—53 米之间,承压水头为 40—70 米。地下水水质分析结果说明,地下水对岩体及灌浆水泥均无溶出性侵蚀,岩体中可溶性成分的含量也极少。

(2) 左岸坝肩岩体属中风化及强风化地区,有比较发育的构造挤压破碎带,其中较大的共有 18 条。分布在 1610—1720 米高程之间,宽度一般为 2—15 厘米,个别的达 40 厘米。压水试验表明构造挤压破碎带的渗透性较小,在 13 次低压 (2 公斤/厘米²) 与 7 次高压 (23 公斤/厘米²) 试验时,均未出现任何机械管涌现象。但由于其产状与岩层产状一致,倾向下游河床,倾角 20°—40°,愈向下游倾角愈陡,相邻地区节理裂隙又比较发育,裂隙率为 0.5—1.0%,靠近岸坡的高达 4%。其中有若干较大的裂隙与层面纵横交错,将岸坡岩体切割为大大小小的三角体。在大坝蓄水后,将是强渗流区,在渗透水压力作用下将直接影响左坝肩的稳定。此外,再往岸里,又有张性断层 F_{80} 及 F_{152} 与河流斜交,也将是绕坝渗流较强的地区。

(3) 右坝肩岩体属微风化地区,断裂分布不发育,岩层产状倾向岸里,建坝后库水入渗条件差,不致影响岸坡稳定。

2. 渗流控制措施

河床主坝共分十个坝段,针对上述地质条件及渗流特点,为了防止集中渗流,降低坝基扬压力,增加坝体及坝基的稳定,对大坝地基采取堵排结合,以排为主的综合处理措施 (图 3, 4)。

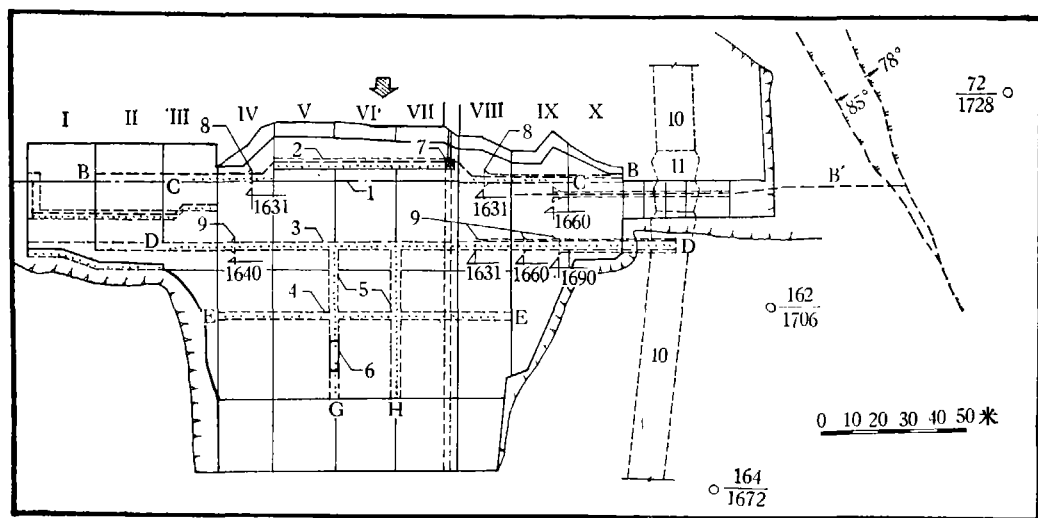


图 4 主坝地基渗流控制平面布置图

B——灌浆帷幕, C——主排水孔幕, D——第 2 排水孔幕, E——第 3 排水孔幕, G, H——横向排水孔幕;
1. 坝轴线, 2. 灌浆排水廊道, 3. 第一基础排水廊道, 4. 第二基础排水廊道, 5. 横向基础排水廊道, 6. 集水井, 7. F_{80} 断层截水墙, 8. 灌浆排水水平洞, 9. 排水洞, 10. 导流隧洞, 11. 导流隧洞堵塞段

(1) 开挖 为了改善地基稳定条件及渗流条件,所有坝段地基都开挖到比较新鲜的岩面,结合 1, 2 号发电机组引水洞洞脸的开挖和 F_{82} 断层处理,将右坝肩 I, II, III 坝段处的基岩开挖较深,直至 1,673 米高程。在左坝肩 IX, X 坝段处,为了截断几条大裂隙以及靠近地表的

构造挤压破碎带,由岸坡向岸里挖深 20—25 米(图 3)。

(2) 灌浆 在河床主坝 II—X 坝段地基平行于坝轴线, 设置深孔水泥灌浆帷幕一排(B 线), 河床部分孔深 50 米, 最终孔距 2 米, 为了防止左岸绕坝渗流的影响, 在左岸又增设深孔水泥灌浆帷幕一道(B' 线), 从主坝 IX 坝段地基开始, 通过左岸副坝地基, 直至越过 F_{80} 及 F_{152} , 孔深 80—120 米(图 4)。另外在河床断裂分布较多的坝块以及中风化地区, 均进行了固结灌浆, 孔深 7—10 米, 孔距 3—4 米, 排距 1.5—2.4 米, 交错排列。

(3) 排水 在河床坝基中, 在灌浆帷幕下游设置了三条纵向排水孔幕(C, D, E 线)及二条横向排水孔幕(G, H 线)。排水孔孔径 13 厘米, 孔距 2 米。排水孔深度, 主排水孔幕 C 线深 25 米, D 线为 15 米, 其他各条均为 10 米。排水系统的布置参看图 4, 其中第一基础排水廊道还与左坝肩 1,631 米高程, 右坝肩 1,640 米高程的排水平洞相连通。第二基础排水廊道也与高程 1,631 米以下的坝肩排水廊道相贯通, 所有河床地基的渗水均汇集至 V, VI 坝段之间的集水井中, 由水泵抽水排至下游。

左岸坡(VIII 坝段以左)的排水系统由排水孔幕、排水平洞及左岸导流隧洞共同组成(图 3, 4)。排水孔幕二排均设在高程 1,631 米的平洞内, 孔深 14 米, 孔距 2.5 米。排水平洞利用不同高程(1,631, 1,660, 1,690)的地质勘探平洞, 并都向岸里延伸至导流隧洞洞顶。导流隧洞洞顶高程 1,625 米, 在洞顶都钻有扇形排水孔, 并做有排水管道, 以拦截左岸的绕流, 并通过导流洞排至下游。

(4) 断层带处理 F_{69} 顺河张性断层带的处理, 首先在深孔灌浆帷幕线处, 挖深约 15 米, 断面为 3×4 米的竖井, 回填混凝土作截水墙, 并于墙下作 36 米的深孔水泥灌浆帷幕。在墙下游的断层均挖槽回填混凝土作成塞子, 开挖深度等于断层宽度。在断层槽两侧影响带都进

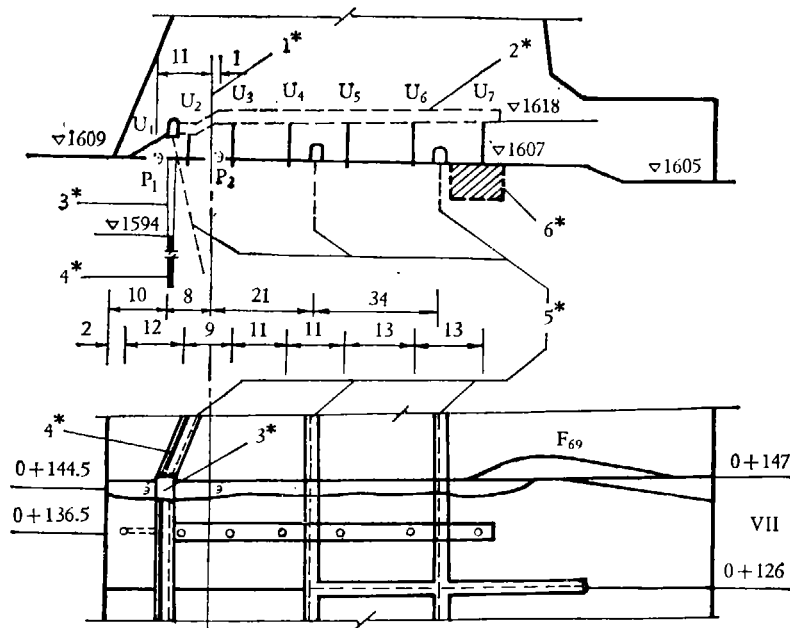


图 5 刘家峡水电站主坝 VII 坝段扬压力观测布置图

$U_1, U_2, \dots, U_7$ ——测压管编号, P_1, P_2 ——渗压计编号, 1*. 坝轴线, 2*. 观测廊道, 3*. 混凝土截水墙, 4*. 灌浆帷幕, 5*. 排水孔幕, 6*. 集水井

行了孔深为 15 米的水泥固结灌浆,在断层上的排水孔幕,为了防止机械管涌,加填了反滤料。

3. 现场观测

为了保证大坝安全运行,监视渗流控制效果,并为今后水利水电坝工建设提供依据,进行了扬压力、渗水量、地下水位、坝前淤积泥沙以及水质等项目的观测和试验。其中扬压力观测主要布置在断裂分布较多的第 VII 坝段(图 5)。

初期运行观测资料表明,大坝地基渗流控制取得了预期效果。实测扬压力过程线与库水位过程线有规律地变化着,并渐趋稳定(图 6)。排水孔幕的排水降压作用显著(图 7)。深孔水泥灌浆帷幕,对堵塞局部强透水地段,防止集中渗流,起了良好作用,坝基渗水量小。F₉₉ 断层带的处理,从截水墙前后的观测值表明,有效地防止了集中渗流的产生(表 1)。左坝肩也采用了开挖、深孔灌浆帷幕和一系列排水措施,降低了作用于坝肩的渗透压力,保证了岸坡的稳定。

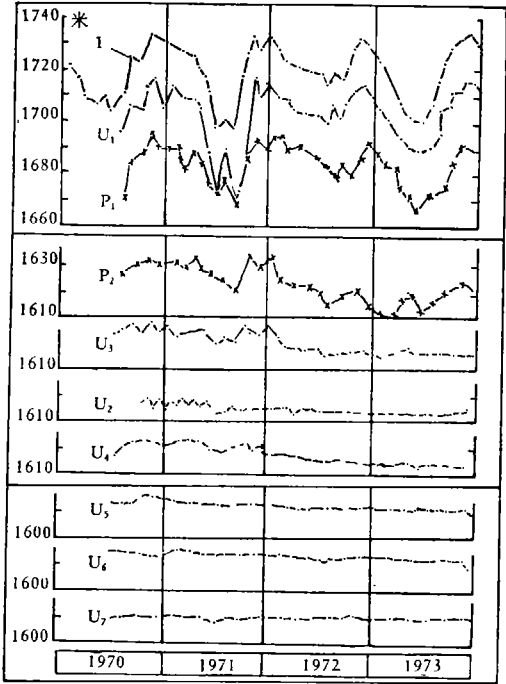


图 6 刘家峡水电站主坝 VII 坝段扬压力观测过程线图
 $U_1, U_2, \dots, U_7$ ——测压管编号,
 P_1, P_2 ——渗压计编号, 1. 库水位线

表 1 截水墙前后扬压力系数表

观 测 时 间 (年、月、日)	水 库 水 位 (米)	尾 水 位 (米)	集水井控制水位 (米)	扬 压 力 系 数	
				渗 压 计 P_1 距 坝 踵 0.06B	渗 压 计 P_2 距 坝 踵 0.16B
1970.10.27	1,734.85	1,622.46	1,612.00	0.75	0.19
1971.10.15	1,734.31	1,623.14	1,612.00	0.73	0.20
1972.11.7	1,732.75	1,622.38	1,607.00	0.70	0.04
1973.11.19	1,734.58	1,623.60	1,607.00	0.70	0.09

注: B——坝底宽

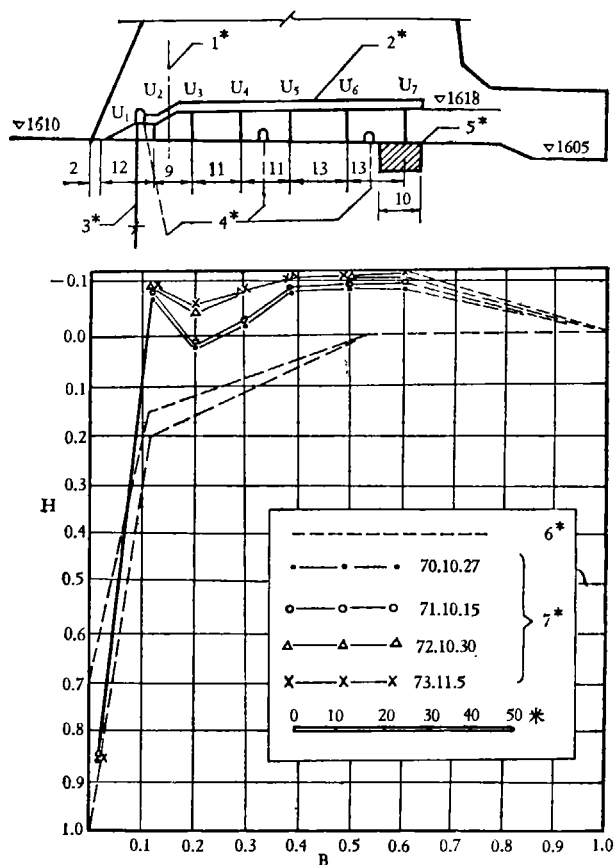


图 7 刘家峡水电站主坝 VII 坝段扬压力分布图
 $U_1, U_2, \dots, U_7$ ——测压管编号, H ——水头, B ——坝底宽;
 1*.坝轴线, 2*.观测廊道, 3*.灌浆帷幕, 4*.排水孔幕, 5*.集水井,
 6* 扬压力计算值; 7*.扬压力实测值

三、几个问题的讨论

1. 河床坝基排水问题

河床坝基排水问题的合理解决, 取决于对基岩地质条件与渗流特性的正确认识。刘家峡坝基由于采取了堵排结合, 以排为主的综合处理措施, 排水减压效果比较显著(图 6, 7)。

深孔灌浆帷幕堵塞了局部强透水地段, 防止了集中渗流。根据地质条件, 主排水孔幕的深度选定为 25 米, 这是为了使排水孔幕既不致进入承压水层, 而又能有效地排除浅层裂隙水。当排水孔幕的深度已定时, 排水孔幕的控制水位对降低扬压力起主要作用。当采用排水控制水位低于尾水位的排水方式时, 降低扬压力的作用尤为显著。但是, 必须指出, 采用这种排水方式排水降压时, 应该校验是否会因岩体中水力坡降过陡, 而导致灌浆帷幕或岩体中充填物的机械管涌、或化学溶滤。根据刘家峡坝基岩性较好, 充填物可溶性物质很少, 又系弱透水性地基, 而尾水位又较高等特点, 选定排水控制水位低于尾水位的方式是适当的, 这已由上述扬压力资料获得证明。表 2 是刘家峡大坝蓄水后的水质化学分析主要成果, 对此表明, 主排水孔的 Ca^{2+}

离子含量及 pH 值同水库水基本一致,可以认为未发生溶出性侵蚀。坝基渗水中有一些离子,如 Cl^{-1} 及 SO_4^{-2} 根离子,含量比水库水有所增加,是由于少量地下水渗入河床坝基的结果。这里再次表明目前采用的排水方式是合适的。

表 2 蓄水后水质分析主要项目成果表

类 别	取 样 地 点	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻¹	SO ₄ ⁻²	暂 时 硬 度 (德 国 度)	游 离 CO ₂ 毫克/升	pH
		毫克/升						
水 库 水	主 坝 上 游	62	7	16	19	8.7	0	8.4
主排水孔水	坝 内 廊 道	77	31	161	357	5.4	0	8.5
地 下 水	左岸观测孔	609	220	2634	2543	7.1	9	7.8

在选定排水措施时,纵向排水孔幕设几排,也是值得讨论的问题。刘家峡坝基设三排纵向排水孔幕,同两排横向排水孔幕构成排水网。观测资料表明,主排水孔幕(C线)起到了良好的排水减压作用;D线起到了辅助排水降压作用,使其下游的坝基扬压力未再出现回升现象。根据实地观测,E线无水排出,另外第一及第二基础排水廊道及横向排水廊道,对排除岸坡绕渗水的作用显著。由此我们认为,在水头较高,坝底宽度较大,坝基岩性好而又为弱透水性地基的情况下,当排水孔具有一定深度时,按上述排水方式,设两排排水孔幕即可满足降压要求。若估计有较大的绕坝渗流,地基又可能受承压水顶托的情况下,为确保大坝安全,施工时可预留一条基础廊道。大坝运行后,当观测资料表明两排排水孔幕尚不能满足降低扬压力要求时,再钻设第三排排水孔幕,这样可能在技术上与经济上都比较合理。

2. 狭谷河床坝肩的绕坝渗流

狭谷河床坝肩绕坝渗流是坝基渗流控制中必须考虑的重要方面,刘家峡主坝河谷狭窄,地基岩层产状又与河流斜交,两岸坝肩具有不同的渗流特性。左坝肩岩层产状倾向河床和下游,又有断裂和挤压破碎带的切割,透水性大,因此绕渗问题突出。在地基处理时,针对左岸绕坝渗流的特点,采取了一系列措施。从蓄水后运行观测资料表明,这些措施是必要的,也是合适的。坝肩绕坝渗流控制与河床地基的渗流控制,具有同等重要的意义。

图 8 是左岸绕坝渗流区三个观测孔的地下水位过程线,它们的水位变化与库水位极为密切,滞后时间仅有 3—5 天,观测孔水位也较高。但在下游岸坡均未见有渗水出逸,表明绕流都由左坝肩一系列排水系统排走。根据左坝肩整个排水系统渗流量分区观测,在高水头运行时,左坝肩总排水量为 269 公升/分,其中坝肩不同高程排水洞的渗水量在 1,660 米以上为 20 公升/分,1,660—1,681 米为 34 公升/分,1,631—1,610 米为 65 公升/分,合计约占左坝肩总排水量的 45%,导流洞排走的渗水量为 150 公升/分,占左坝肩总排水量的 55%。这里可以明显看出,左岸绕坝渗流水位虽较高,但至导流隧洞处形成一排水漏斗,大部分的渗水由导流隧洞洞顶的排水系统排走,剩余的渗流水也由不同高程的排水平洞以及排水孔幕的拦截,以自流方式或抽水排水方式排至下游。由此减小了作用于坝肩的渗透压力,防止了下游坡脚的渗流破坏,保证了岸坡稳定。

其次,从坝肩绕坝渗流与河床坝基渗水量的关系来看,左坝肩绕坝渗流是河床渗流主要补给来源之一。虽然左坝肩经过了渗流控制处理,在运行观测中仍可看出它的重大影响。根据

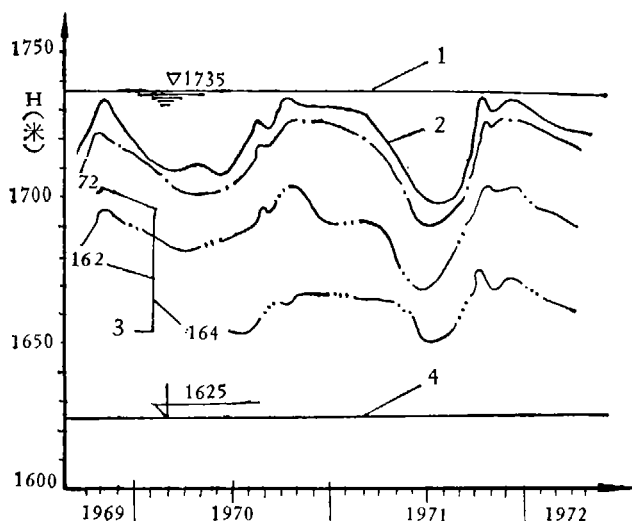


图 8 左岸绕渗区地下水位过程线图

1. 正常高水位, 2. 水库水位线, 3. 观测孔地下水水位线, 4. 导流洞洞顶高程

实测, 当抽水排水控制高程为 1,607 米时, 主排水孔幕 (C 线) 渗水量约为 9 公升/分, D 线排水孔幕及两坝肩 (1,631 米以下) 渗水量约为 71 公升/分, E 线排水孔幕及两坝肩的渗水量约为 40 公升/分 (E 线排水孔幕实际无水排出), 以上三者合计约为 120 公升/分。从扬压力观测资料表明, 主排水幕 C 线在降低坝基扬压力方面起了主要作用。这也表明了河床坝基渗水, 主要由 C 线排走。但这里 C 线渗水量仅 9 公升/分, 仅为总量的 7.5%。这个事实表明, 1,631 米以下两坝肩的渗水量远大于河床地基的渗水量。若与整个左坝肩的渗水量相比, 则坝肩的绕坝渗流量与河床地基的渗流量两者间的差别就更为显著。另外, 以 1,631 米以下的两坝肩的渗水量相比, 左坝肩为 65 公升/分, 右坝肩为 39 公升/分, 左坝肩比右坝肩约大 70%, 这是由于左坝肩与右坝肩的渗流入渗与排泄条件都大不相同的结果。

由此我们认为, 狭谷河床坝基的渗流控制, 必须充分考虑河谷地形、地质条件的影响, 正确确定渗流控制的边界条件。在设计时, 对狭谷地基应按三向渗流问题, 研究渗流控制的处理措施。

3. 坝前淤积泥沙对坝踵扬压力影响

黄河系多泥沙河流, 一般在大坝修建时都应考虑淤积泥沙对扬压力的影响。刘家峡河段由于附近支流洮河来沙量较大, 多年平均含沙量为 3.3 公斤/米³, 每年汛期 (7—9 月) 的输沙量较集中, 约占全年的 80%。在水库蓄水后的头二年内就基本上形成了坝前的淤泥层。以后由于已接近泄水道孔口高程, 淤积速度显著减缓, 迄今淤泥层总厚度达 50 多米。从 1970 年以来, 扬压力观测资料表明 (图 6, 7), 测压管 U_1 的扬压力系数基本上趋于稳定, 变化在 0.84 左右。看来由于淤积泥沙导致的水头损失是比较小的。但下游顺河道距离约 500 多公里的青铜峡水电站的观测资料表明, 淤泥层形成后, 其坝踵处扬压力系数 (α_0) 为 0.4, 这里淤积泥沙对削减坝踵处扬压力的影响就特别明显。对比这两个电站的资料, 淤积速度都较快, 坝前泥沙颗粒组成和渗透系数基本一致, 所不同的是刘家峡大坝岩基渗透系数 K_1 (10⁻⁶ 厘米/秒) 比淤泥层渗透系数 K_2 约小 10 倍; 但青铜峡大坝地基系破碎的石灰岩、沙岩及页岩互层, 基岩渗透系数

$K_1(10^{-2} \sim 10^{-3}$ 厘米/秒)比淤泥层渗透系数 K_2 要大 100 倍至 1000 倍。由此可见,当考虑淤积泥沙对坝踵处扬压力的影响时,应着重研究岩基渗透系数 K_1 与淤泥层渗透系数 K_2 的相互关系。 K_1 与 K_2 比值愈大,淤泥层对降低坝踵处扬压力的影响就愈明显,反之,则影响较小。

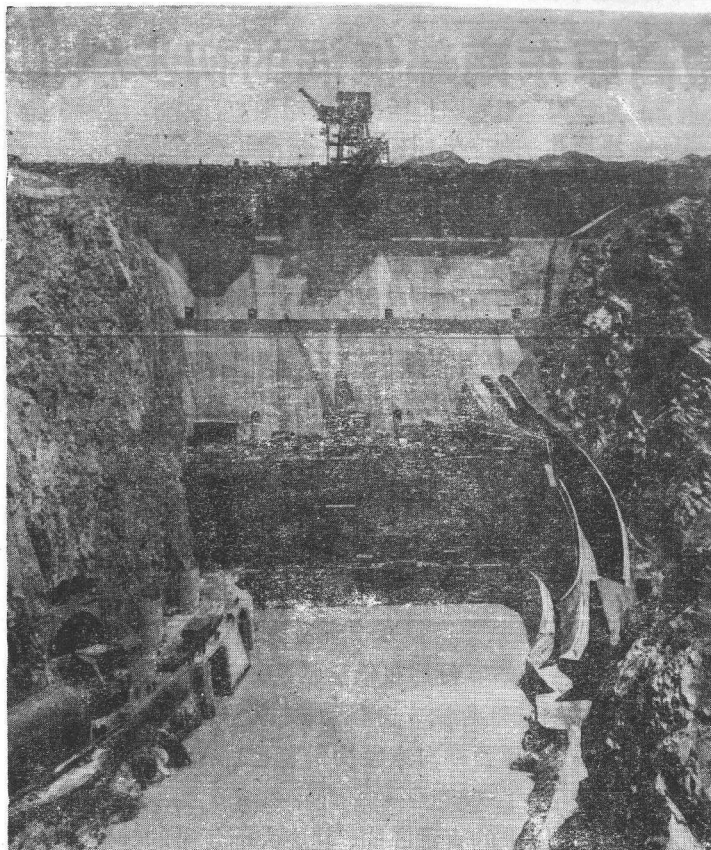
四、结 语

通过刘家峡主坝地基及坝肩的渗流控制,我们有下列几点认识:

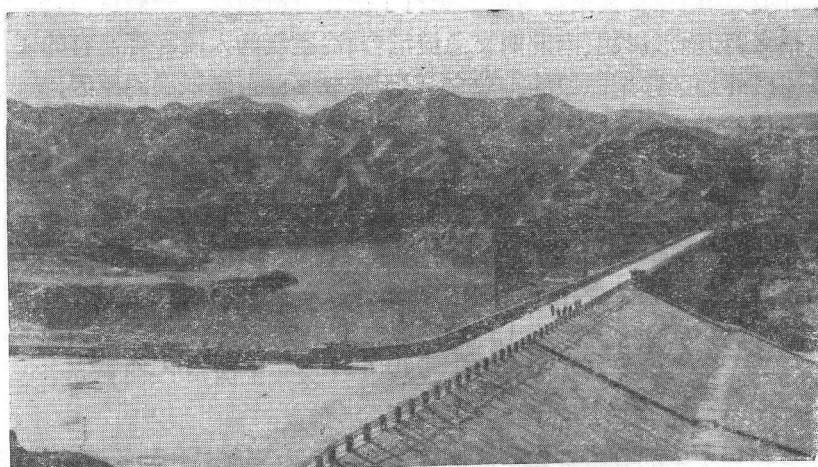
1. 坝基岩性坚硬、透水性小的弱透水地基,渗流控制采用堵排结合,以排为主的措施是适宜的。当下游水位较高,岩体又不致产生机械管涌与化学溶滤的情况下,采用排水控制水位低于下游尾水位的排水方式,是降低坝基扬压力的有效措施。

2. 狭谷河床的渗流控制必须结合河谷地形、岩层产状、坝基断裂分布以及各分区的渗流特性,正确确定渗流边界条件,在设计时应考虑坝肩的绕坝渗流的影响,按三向渗流特点,研究相应的处理措施。

3. 在多泥沙河流上修建大坝,当考虑坝前淤积泥沙对坝踵处扬压力的影响时,应着重研究淤泥层的渗透性能与岩基渗透性能的相互关系,然后选用适当的扬压力参数。



照片 1 刘家峡水电站主坝



照片 2 刘家峡水电站黄土副坝