

卡里巴水力枢纽

譯文集

水利电力部东北勘测设计院技术室

一九六六年六月

卡里巴水力枢纽

前 言

本文共分两部分。第一部分在概述了M. 柯恩的报告内容之后，对最后两年大坝施工所迁到的问题：截流、下游洪水、溢洪道、坝顶和右岸坝肩的加固等做了较详细的说明。

第二部分包括两个问题：

一是地下建筑物，包括六条隧洞、六条取水井、一座厂房、三条尾水隧洞和一座变压器间的施工。

二是工地的一般组织问题。

本文大部分是按原文全译，个别章节有所取舍。

編者按：卡里巴水电站是非洲已建成的最大的水电站之一，坝体为混凝土双曲拱坝。坝高125米，坝顶长600米，坝体混凝土量107万米³。库容1600亿立方米。水电站为地下式厂房，初期装机60万千瓦，年发电量35亿度。第二期完工后，年发电量可达80亿度。地下厂房长143米，宽23米，高40米。有13条竖井和29条廊道。该工程分两期施工，于1955年开始施工，1960年1月第一台机组投入运行。

文集收入了1965年第5期“水利水电译丛”中“卡里巴水电站左岸拱围堰的设计和施工”一文。由于我们的技术和外文水平有限，缺点和错误一定不少，希望同志们批评指正。

目 录

1. 卡里巴水力枢纽 1
2. 卡里巴地下工程的设计和施工方法 23
3. 卡里巴水电站左岸拱围堰的设计和施工 43
4. 卡里巴坝混凝土的人工冷却介绍 56
5. 卡里巴大坝蓄水观测 61

目 录

第一部分

- 一、柯恩报告概述
- 二、临时洩水孔的封閉
- 三、下游供水
- 四、溢流問題
- 五、坝 頂
- 六、右岸坝肩的处理
- 七、大坝的运行观测

第二部分

- 一、地下建筑物
1. 地形地质
2. 建筑物描述
3. 建筑物的施工
4. 一般技术介绍
- 二、一般問題—施工組織

第一部分

一、柯恩报告概述

一九五八年四月，柯恩作了关于卡里巴水力枢纽的报告。当时工程还没完工，所以，他还不能谈到工地现在的实际变动情况。在没谈到这一点之前，先介绍一下柯恩的报告。

赞比西河流经罗德西亚和尼亚萨兰联邦（图1略）其平均流量比法国的罗纳河（Rhône）平均流量稍小些。

卡里巴峡谷上溯二十五公里是广阔的平原，可供建造一座世界上最大的容量为1600亿立方米的水库。该水库能够完全调节赞比西河，第一座电站每年可发电35亿度，第二座电站建成后，年发电量可达80亿度。

卡里巴峡谷虽然很宽，但仍然可以修建拱坝，坝高125米，坝顶长600米，混凝土方量为100万立方米（图2）双曲拱坝的剖面形状是通过一系列的計算和模型試驗后确定的。因为河谷很宽，而使得坝顶很厚，剖面形状并不典型（图3）。

电站于1960年初开始供电。该工程是在1955年2~3月間洪水（每年这个时间都要发生洪水）的威胁下开工的。

利用枯水期出露的岩石浅滩，在河流左岸修建了第一期混凝土围堰，它是一个高18米，半径180米的半圆拱。同时，在右岸还开凿了一条断面积为100平方米的辅助导流隧洞。

1956年末，这项工程完工，并在围堰内开始浇筑混凝土（图4，照片略）。

7个月后，即1957年的7月初，为通过左岸坝体上的临时缺口导流，把围堰炸出一个缺口。这次爆破用了三吨炸药，并一次就成功了（图5）。

另外，用150000吨碎石堵截了束窄的河床。碎石是从栈桥上倾倒下来。在水流平静地区，设置两道钢板桩做为第二期围堰的基础，该围堰是一高45米半径115米的园形拱（图6，照片略）。

1957年末，在园形拱围堰内进行大坝的混凝土浇筑工作，但是，两个月后，即1958年2月，发生了大洪水，3月5日洪峰流量达到16000米³/秒，比已掌握的洪水资料几乎大一倍。桥、公路和工地上的一些临时建筑物都被冲毁了。围堰顶上的水深为3米。此时围堰内只浇筑了几个坝段。洪水消落后发现，只有一些临时建筑物和设备受到了损失。最严重的，是水流从围堰基础下面冒出来，必须用小栏栅从内侧加以堵塞。

园形围堰内坝段的混凝土浇筑，由于过拱而延迟了。但是，从1958年7月起，这些浇筑块又从基础上显著地升了起来。到了11月，就达到了足够的高度，并封闭了导流孔，截断了河流。这座世界上最大的水库在建成之前就开始蓄水了。

下面就1958年中旬以来，工程施工过程的具体情况作一介绍。

二 临时洩水孔的封閉

起初，打算用鋼筋混凝土閘門封孔，即在每個孔前面，用隔墩在孔的中間把孔分成兩部分，把大體積的門板懸吊在鋼繩上，然後用炸藥將鋼繩炸斷，使門板沿門槽降下。但是，1958年的大洪水造成了嚴重的災害，毀壞了一部分堵孔所要用的設備，因此，不得不採用另外一種方法封孔。其具體過程如下（圖7）：

首先用纜式機將焊接鋼欄柵堆放在孔前，欄柵的網眼為40厘米，可在水庫蓄水之前通過水流。

從1958年9月初起，開始在欄柵的上游傾倒石料，先堆放大塊，然後堆放小塊。最後用由浮船運土料堵塞。這時，水位開始迅速上升，堆在欄柵上的卵石和土料越來越緊密，而在幾個星期之後完全堵死孔口。事實證明，這種封孔措施是成功的。

三 下游洪水

在水流還沒通過電站下線之前，每年某些時候，下游有缺水之危險。因此，在有關國際協議中規定：通過卡里巴的最小流量不應低於 $280 \text{ 米}^3/\text{秒}$ ——除非河流本身的天然流量低於這個數字。後來又改在58~59年間的雨季截流，故最小流量維持 $14 \text{ 米}^3/\text{秒}$ 就可以了。

為了保證通過不同流量，採用的辦法是：在壩體混凝土內予留直徑2米左右的孔洞，其內壁用鋼板保護（圖8），並取消了原來預計在孔洞上游處設置的支承球體的木座墊。在每個孔道上游處用磚砌成

减压拱，当需要洪水时，再用炸藥将该拱炸除。

封孔时借助于纜式机把钢筋混凝土球体放下来（图9），水流瞬間就把球体推到它应在的位置上。孔道被球体堵塞后，就可以在孔洞里进行混凝土浇筑。球体从一个孔洞中取出后，还可以用于相邻的孔洞。27个孔洞布置在四个不同的高程上，这样就可以经常而精确地保证下游所需之水量（图10），直到庫水位达到相当高度，可以利用溢洪道泄流为止。

四 溢流問題

卡里巴坝溢洪道的設計是一个很艰巨的研究項目。开始，設計了坝頂溢洪道。該方案要求对下游坝脚处的河谷基础很好地加以保护。为取消这个造价很高的保护措施，柯恩提出了用有压溢洪道代替表面溢洪道的方案。

这种有压溢洪道，其压力水流可射出100米左右，而且下游河谷可以不用保护（图11），冲刷坑也远离了坝脚。在溢流孔下游側安装三扇9.0米×9.3米的平板閘門。当水庫蓄滿水时，其作用水头为30米，为检修溢流孔或平板閘門，在上游处安装有迭梁閘門。注意力主要集中在，使水流射得尽量远，和为了減輕破坏性的冲刷，使水流尽量散开。经过几个月的試驗，終于找到这样一种型式，即在閘門上游側，每个孔內都設导流設備，而在其下游設挑水板。尽管做了很大努力，在閘門下游側边墩的混凝土中加些鋼筋，但仍然不能

充分抵抗巨大的推力。为避免在閘門槽处发生气蚀，必须使洩水孔十分通暢。

因此，采用了焊接鋼板予制块体（图 1 2）的办法。倘若这种予制块体能够解决土木工程上的问题，则給工程设计带来的好处是很大的。

这种块体可以沿着洩水孔整个高度上堆砌。而块体的安装、調整和封閉要在側墩下游部分的混凝土浇筑之前就进行。向外面突出的部分是在予制壳体内进行浇筑的，这种壳体可以作模板之用。

卡里巴坝上还設置了专门的放污道（图 1 3）。当水库蓄满水时，因为要宣洩水上漂浮物，若孔口布置得很低，則閘門可能有打不开的危险。那末，能否設置表面輔助溢洪道呢？考虑到原来的要求，采用了一种最经济的方案，即把其中的一个有压孔变为无压孔。方法是：把側墩和孔的前沿均向上游延伸（图 1 3）；为了开启一直伸到水面以下若干米深的透梁閘門，还設置了輔助閘門。当木流連同其表面漂浮物一同下洩时，必須将履帶式閘門大开度地打开。溢洪道六个孔的下洩流量可达 $10000 \text{ 米}^3/\text{秒}$ 。由于水库汇水面积之辽阔，流量为 $20000 \text{ 米}^3/\text{秒}$ 的洪水往往持續若干天，甚至是几个星期，溢洪道也很容易地把它們洩下去。

卡里巴水库的容积到底大到怎样的程度，可以这样来说明：按水库 1 8 厘米厚的水层計算，容积就有 10 亿立方米，比法国的射尔一

庞桑水库的容积还大。

五 坝顶

卡里巴坝顶厚为 13 米，但是为了供交通之用，必须设 12 米宽的公路，两侧分别设 1.8 米宽的人行道。因此，坝顶有一部分必须采取悬臂的形式。考虑到建筑上的缘故，全部悬臂都伸向上游。由于下游栏杆形状简单而引起很大的作用力，均由下游坝面的延伸部分承受，但该地区，日照时间非常长，栏杆对面的部分感光性很强，因此，造成模板凸凹不平，从而使这部分很不规则。不过，幸好卡里巴不是个风景区。

为了施工方便，尤其是为了完美起见，应该大力提倡采用预制构件。因此，向上游伸出的悬臂（图 14，照片略）和下游栏杆（图 15 略）以及人行道的边框等都是预制的。预制块尺寸的大小根据缆式机的起吊能力决定。

公路及人行道采用瀝青混凝土路面。

六 右岸坝肩的处理

除了左岸上部的三分之一外，大坝座落在变质片麻岩层上。右岸上部的三分之一是石英岩。这种岩石不过是另一种易变质的片麻岩。这两种岩石年龄相同，都是由不同特性的沉积岩构成的：片麻岩由淤泥构成，石英岩由砂构成。

后来因地壳运动，使得比片麻岩还坚硬的石英岩由于不能适应变

形产生了裂缝，被切成块状。有的裂缝被碎石充填，有的又闭合了。

这种普遍裂缝的结果，引起了岩石的渗水。透过石英岩的雨水也可以使片麻岩层受到腐蚀。

为了使石英岩的不透水性达到要求，必需进行固结灌浆。要按时完成固结灌浆的任务并不困难，可是，岸坡的加固倒很困难。

灌浆的问题是用压力水或压缩空气冲净裂缝中的杂物，然后再用水泥或石灰浆灌浆。而岸坡的加固是通过井或平洞直接挖除岩石，然后回填混凝土。

七 大坝的运行观测

1957~1958年两次洪水过后（两次洪水都耽误了施工），赞比西河又恢复到原来的状况。1959、1960年都是中水年，年水量为400亿立方米左右。第一年水位上升60米，第二年上升12米左右。此时水位还在坝顶以下25米，经过第三年后，水库才能蓄满。

自从最初蓄水（大坝完工前）以来，用各种不同测量方法观测大坝的运行情况，其中包括在坝体内埋设仪器和进行大地三角测量。在建筑物内埋设了三百左右个弦式振动音响应变仪和一百个左右电阻温度计。

蓄水第一年和第二年来，拱的半个厚度的主应力情况如图17所示。在第一年末的应力图中，临时洩水孔，左右岸坡脚处的拉应力的

特殊情况可以通过施工的方式加以解释。后两个区域在蓄水之后才进行灌浆。而在封缝之前，拱还没起到整体作用。

在蓄水第二年末的应力图上，也记录了应力随水位上升和坝体内部分散热增加而增大的情况。由于内部温度升高而造成体积膨胀，使得大坝这个区域的内部应力增大，而表面应力减小。

在厚层变质岩地基表面上进行大地测量是件很细致的工作，因为在岩基上建立测站很困难，测量结果表明，这些测站都有些位移。

大坝观测结果表明，拱的变形在允许范围之内。另外，通过蛇形管中的冷却循环水对混凝土进行人工冷却，将温度降低至周围气温以下，使封缝不会开裂。

八 水上漂浮物(略)

第二部分

一、地下建筑物

该电站共安装六台交流发电机，每台机组的容量为70万千瓦，转速为167转/分。六台法兰西式水轮机，平均净工作水头为95米。每两台机组联接三台单相变压器。变压器容量为8百千伏安，它可以把18千伏的电压升高到330千伏。连同备用在内，一共有十多台变压器。电机与变压器通过充油电缆相连接。

这些设备的建筑物均布置在地下，位于大坝左岸拱座的上游(图20)。

与地上方案相比，地下方案具有很多优点：

(1) 大坝和厂房施工工地分置两处，可以避免施工干扰，使得象导流、截流等施工较困难的工程达到了企业化。

(2) 可以使得厂房的施工早日进行。

(3) 厂房施工工地不受洪水的影响。1958年大洪水使得河床上的工程停工四个月，这更表明了选用地下布置方案是合理的。

1. 地形和地质

右岸的地形和地质：

山坡与水平面成35度角左右。

在设计前和设计过程中的地质勘探工作包括：

(1) 地质调查和竖井：

(2) 通到厂房心脏的平洞和通过该平洞的钻孔。

M 马尔丁所做的关于大坝右岸地质的描述只集中于地下建筑物地区：岸边下部三分之二为片麻岩，上部三分之一为很破碎的石英岩。

2. 建筑物描述

首先来看看图21和22中的建筑物：

每台水轮机的流量为125米³/秒左右，引水洞水平段矩形断面的尺寸为6.1米×4.9米，垂直段管道上部的直径为6.1米，下部直径为5.2米，钢板衬砌的最大厚度为32毫米。

库底有9米厚的泥灰岩，进水口在最低水位以下15米，但其中

3、4号进水口还在15米以下。蓄水初期的中水年，在3、4号机组准备投入运行时，水位还没有达到所需高度，因此，又修建两个低临时进水口，以便在1、2号机组安装完毕就立刻投入运行。当最后永久进水口建完后，这两个临时进水口将被放棄。

在垂直拐弯的上游处安装有扇形閘門，緊靠每扇閘門上游的門槽安放送梁閘門，扇形閘門的操作在操作平台上进行。在操作平台上布置有送梁閘門的門式机、清污机的門式机，当然也包括这些門式机的軌道（图23，照片略）。

水輪机軸在下游最低水位以下4米。

值得注意的是，該电站的发电引水和泵水的方向是相同的。这給施工带来了很多困难，但这一方案同原方案相比減少了开挖量。原方案是在与引水相反的方向上升挖两条尾水隧洞。

在尾水管的出口，将水輪机同下游河水隔开来的送梁閘門在与压力鋼管相邻的井內放下来（图24，照片略）。

在尾水隧洞的进口，布置有調压塔，其直径为19米，高51米。調压塔的数量同尾水隧洞一样（即三个）。每个調压塔联接两台水輪机。尾水隧洞长300米。总是在有压的情况下运行。其中有一条尾水隧洞利用了导流隧洞三分之二的长度。

尾水隧洞的出口設有送梁閘門槽（图25、26，照片略）。

模型試驗表明，在河中設置很厚的导流墙是必要的，以免洩洪时

洪水的冲刷物堆积在尾水渠出口处。

主机間(图 27、28, 照片略)与河流平行布置, 长 142 米, 宽 23 米。水轮机井在浇筑混凝土之前开挖了 40 米。操作間通过电梯穿过 175 米的竖井可以达到主机間(图 23, 照片略)。器材可以用汽车经过一条通往主机間的倾斜交通洞运来, 电站的装卸场有两台吊车, 起吊能力为 180 吨。

变压器間(图 29, 照片略)与主机間彼此独立, 长为 165 米, 宽 17 米, 高 18 米。除了变压器和遮断器外, 这里还装有湿度调节设备。

联结交流发电机与变压器的 18 千伏的母线安置在六条廊道中(每台发电机引出一条)。

运输变压器用的交通洞断面积最大, 軌道布置在卸货场和变压器間之間。

330 千伏的充油电纜通过一条水平廊道和一条 165 米的垂直竖井引向位于右岸高坡上靠近中央控制室的开关站。

3. 建筑物的施工

(1) 主机間

在交通洞施工結束之前, 因为平洞提前几个月完成了, 主机間的开挖于 1956 年 11 月就开始了。

頂拱的厚度从 2.4 米到 0.8 米, 分两个阶段施工: 首先施工

中央部分，然后再施工两侧拱座。

具体施工过程如图 30 所示：

- 1) 第一步，在拱冠和两个拱座处开挖三条纵向廊道。
- 2) 开掘通向拱冠导洞的侧向廊道，并在横向拱圈开挖后，浇筑混凝土（图 31，照片略）。施工是通过不相邻的环进行的，环宽 2.4 米。但是，经过最初几周的试验，环宽可以采用 3.6 米、4.8 米，岩石好的地方，甚至可以采用 7.2 米。

3) 拱的施工第一步完成后，马上就在侧壁 10 米左右的一段进行岩石开挖，然后进行混凝土浇筑。第一期与第二期混凝土接缝处的止水可以做为以后灌浆止水之用。

岩石出碴可通过平洞和 1.5 号机组轴线上的两个竖井进行。

4) 侧边开挖也不困难，出碴可以通过已完工的机组轴线上的竖井，进厂廊道在开挖后的空隙时间里也可利用。

这种施工方法适用于整个拱，但在上游有一段，长 25 米，片麻岩中掺杂着许多云母，并被粘土夹层所切割。在这部分地区，首先施工拱座，该拱座借助于坚固的支撑通过竖井一直通到新鲜岩石，然后再施工拱圈。

最初设计时，预计墙壁不需要衬砌，吊车梁挂在拱的悬臂构件上。但在开挖期间，发现岩石破碎，因此将原设计进行了一些修改（图 32）

- ① 沿着南侧的墙壁，因为那里片麻岩很破碎，而拱的推力由岩