

卡里巴拱坝的监测和维修

B·戈古尔 A·S·穆帕拉

【提要】卡里巴拱坝，高128m，位于赞比亚和津巴布韦边界的赞比西河上，于1955年至1959年间修建。该坝形成的水库是世界上最大的人工湖之一。水库为两座水电站供水，电站总发电容量为1266MW。该坝及其基础的安全监测是长期的持续的，对指导维修工作起了很重要的作用。尽管该工程规模浩大，历史久远，该坝的运行和维修工程师们必须完全了解和掌握他们所负责运行和管理的建筑物。技术资料和历史背景的综合分析有助于提高和更新对该坝的认识，等于“活的记忆”，由于参与建设和管理该坝的人员随着时间的流逝而变换，这样作是尤为必需的。建筑物的总体性态受右岸（南）复杂地质条件、混凝土长期而缓慢的空间变化和水文条件变化的影响。对1983年以前积累的仪表观测资料作了综合分析研究之后，又在1986年至1989年间提供了补充观测资料。最近已开始对新的观测资料进行分析，以期对有关的长期现象作出解释。

卡里巴水电站距卢萨卡150km，距哈拉里300km。1955年3月，决定在赞比西河卡里巴峡谷建坝时，只是大致确定了坝址位置，详细的地质勘测工作仍必须进行，该工程是非常艰巨的，是一个巨大的挑战。

51个月后，该坝于1959年6月终于建成了，按安德列·关纳（Andre Coyne）对这样一个宽河谷所作的史无前例的设计，总混凝土量仅为 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。尽管连续发生了两次特大洪水，赞比西河被驯服了，蓄水在进行中。

图1示出该工程的总布置，图2示出其施工和运行的历史背景。该坝的主要地质特征则示于图3。

这是一座双曲拱坝，全长617m，最大坝高128m，长高比为4.8。注意，坝长的40%，其坝高超过100m，坝顶厚度13m，坝趾底座上方坝体厚度 $18.5 \text{ m}^{1,2}$ 。

水库长250km，正常高水位时库容为

181 km^3 ，其中 65 km^3 库容处于上部13m运行范围，1963年完成水库蓄水。

在拱坝的中心部位设置了6个泄洪孔，安装下游链轮闸门，其底槛高程在坝顶以下33m，最大库水位时的泄流能力为 $9500 \text{ m}^3/\text{s}$ （即在正常运行条件下每孔的泄流量为 $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ）。水舌向下游抛射距离超过100m，经多年运行，射流在河床轴线上累进地冲刷成一个陡壁冲刷坑。

卡里巴工程的第一期水电开发是在南岸修建一座地下电站厂房。主厂房位于该坝的上游，安装6台机组，单机容量原设计为100MW，但后来提高到111MW。6台机组中的最后一台于1962年3月投入运行。

该工程的第二期水电开发是在北岸修建一座地下电站厂房，安装4台150MW发电机组。1971年开始施工，这4台机组在1975年至1977年间投入运行。

在1981年底发生了一次前所未有的干旱

以后,经过估算,卡里巴水电站的可靠电能约为 8000GWh/年。

两国的赞比西河管理局直接负责水文、水库管理、溢泄道运行、维修和大坝安全。大坝安全涉及监测、定期检查和主坝及两岸坝肩的维修工作。

地质和岸坡稳定性

坝址下伏地层主要为黑云母片麻岩,孤立的伟晶花岗岩脉和石英岩。石英岩在右(南)岸顶部出露。

该坝主要建基于挖除表层风化岩以后的完整、坚硬、致密的片麻岩上。右坝肩上部为节理密集的石英岩层,含云母和软弱层,岩层中有地下水循环。勘探南岸坝肩和确定其准确的地质结构是一个长期的过程,一直延续到该坝建成以后。

旨在改善上部石英岩体特性的灌浆和喷射工程,查明有一连续的下伏风化片麻岩层,坝基必须从此通过。在1962年最后一期蓄水之前,在此建成了4个地下大体积混凝土支墩,由坝肩上增加的一座推力墩加载^{2,3,4}。

自该坝建成开始运行以来,定期溢流放水,包括挑射形成的巨量水雾,卡里巴坝下游南岸的稳定性一直是工程师们所关心的问题。在南岸上分布着许多古滑坡,这些滑坡是特殊的地质演进的结果,赞比西河在该地层中冲刷成两岸陡峻的深谷,而该地层的表层不断地受到热带风化作用的影响。

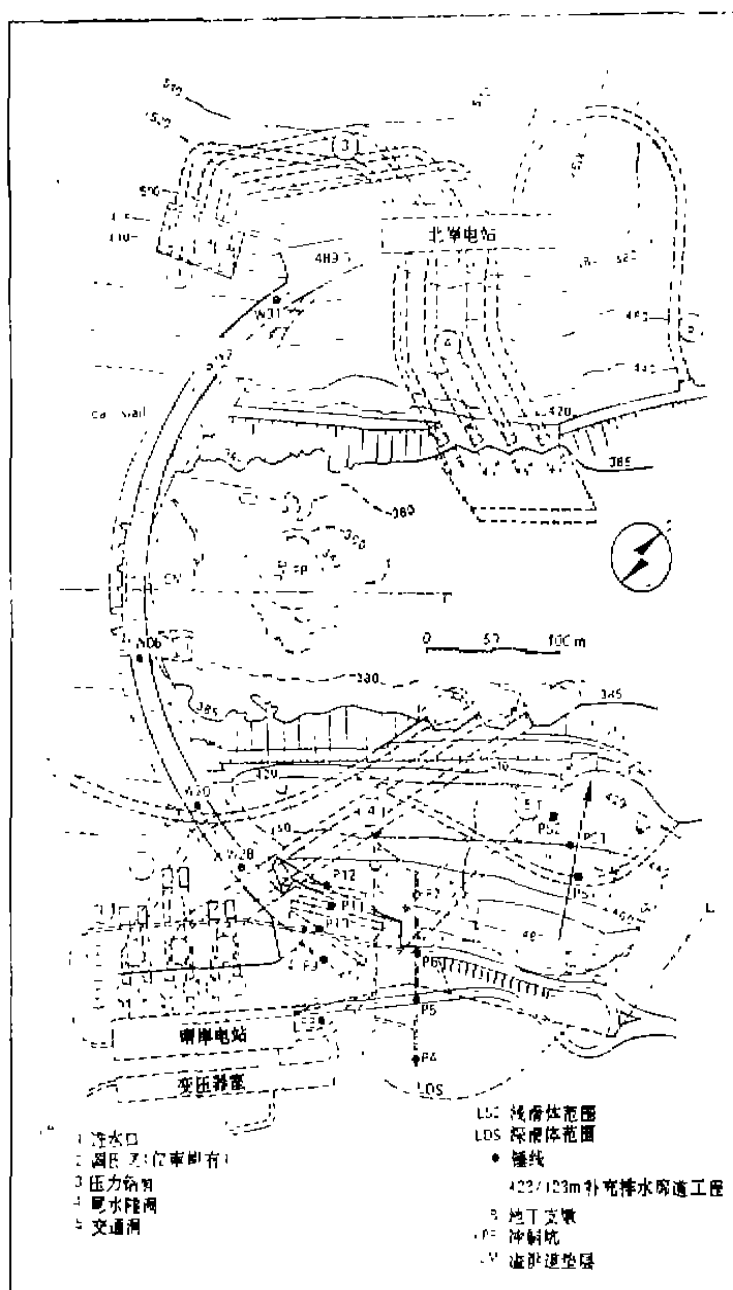


图1 卡里巴工程总布置图

多年来,南岸坝肩下游200m处的“下游边坡”一直是问题不断,已成为过去几年来采取的补救措施的主要目标。这些措施包括排水廊道,布置成扇形的排水孔,重新整形,锚固,表面密封和表面排水⁵。在南岸下游地层中,在坡脚的石英岩和片麻岩接触面出现在30m以下的坝肩岩层中。

边坡活动主要是在1963年采取补救措施以前水库蓄水期间或后来生大量溢流放水期间和特别潮湿的年份观察到的。从1960年到1979年,这些边坡朝赞比西河总共运动了

表1 卡里巴坝址赞比西河径流量

年平均值 ($\text{km}^3 = 10^9 \text{m}^3/\text{年}$)	
1924.10—1952.9, 28年	43
1952.10—1981.9, 29年	59
1981.10—1991.9, 10年	35

表2 卡里巴水量平衡

年平均值 ($\text{km}^3 = 10^9 \text{m}^3/\text{年}$)					
时 段	入库水量	过机水量	溢流量	蒸发量	留蓄
62.10—71.9, 9年	56	18	29	7	+2
71.10—81.9, 10年	67	28	24	8	+1
81.10—91.9, 10年	35	30	-	8	-3

570mm, 采取稳定措施以后的12年间, 这些边坡又以逐渐减小的移动速度向前运动了30mm。九十年代初移动速度约为1.5mm/年。

该坝建成以后, 在以下几个场合中又获得了一些额外的地质资料: 七十年代在修建排水系统和安装倾斜仪期间钻勘探孔; 八十年代为南岸续建工程作专门的勘测工作(续建工程为安装2台150MW机组的地下厂房); 最后, 是在装设新的锤线装置期间。

水文和溢流

卡里巴峡以上流域面积约为664000 km^2 , 其中维多利亚瀑布上游占86.5%, 产

水量占水库入流量的84%。赞比西河流域的降雨具有明显的季节性, 主要径流发生在1—5月。

1957年至1958年, 最大年径流量为97 km^3 , 最大流量16000 m^3/s 发生在1958年3月, 淹没了主围堰; 最小年径流量21 km^3 发生在1948—1949年。表1和2示出了长期的水文变化情况, 自1982年以来发生了史无前例的持续干旱。

目前考虑的特大洪水, 3个月来水量为108 km^3 , 或年径流量为168 km^3 。该水库可调蓄约5 km^3/m 的最大洪水量, 从而获得洪水调节效益。但是需要准确的降雨资料 and 高度可靠的洪水预警系统⁹。6扇闸门全部打开, 溢洪道最大泄流容量为24 $\text{km}^3/\text{月}$ 。但是, 最好是减小泄流量, 延长溢流时间。

在头20年运行期间, 泄洪闸门总共渲泄了512 km^3 的水量, 最大值65 km^3 (3个月泄量) 发生在1978年。冲刷坑冲刷深度在正常尾水位以下78m, 目前已趋于稳定。

冲刷下来的岩块在冲刷坑下游形成了一道沙坝, 总体积约为200 $\times 10^3 \text{m}^3$ (约为总冲刷物体积的一半), 在六十年代不得不作了清除处理。

每次长时间溢流之后, 用测深锤对冲刷坑进行了准确的测量, 并作了水下检查。对上游边坡上的冲刷地带, 如孔洞、夹层和倒悬部位作了水下修补, 用潜水、锚固和灌浆技术作了加固, 以阻止软弱黑云母夹层发生

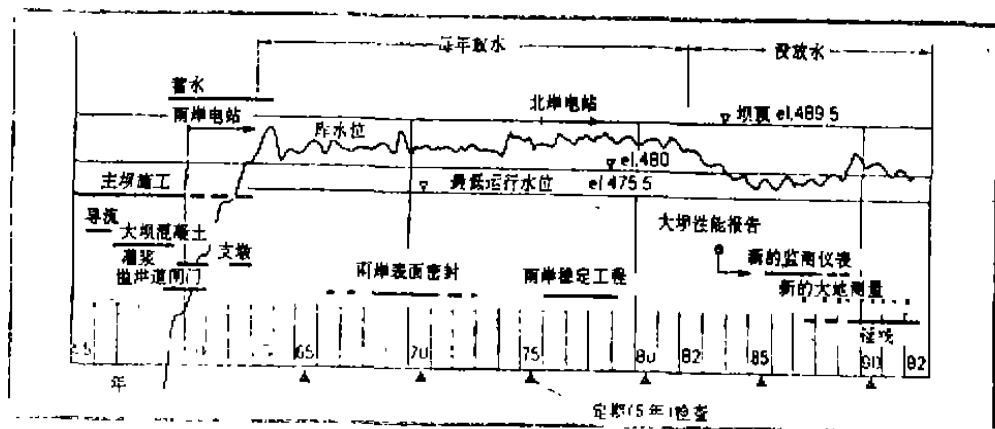


图2 历史背景资料

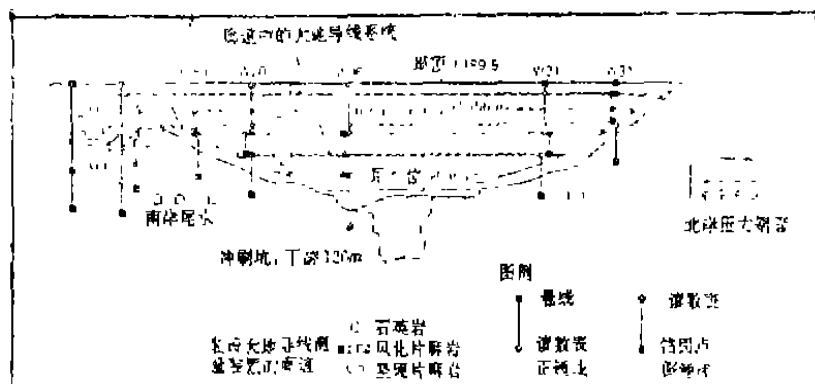


图3 下游展开立视图

溯源冲刷。已作了9次这样的维修工作。

毫无疑问,冲刷坑的发展和较高部位松动岩石岸坡失稳之间没有直接的结构关系。但是,四、五孔闸门泄水时,造成的振动和严重的水雾使滑动区域或蠕变区域的情况恶化。在南岸所作的表面密封工作证明是有效的,成了维修工作的重点之一。

泄洪孔经过20年的运行,其混凝土的侵蚀冲刷局限于叠梁进口,面积几平方米,深度几厘米,这些地方用环氧砂浆成功地作了修补。

1988年前的监测系统

在该坝的施工期间及建成以后,装设了各种型式的仪器设备,以监测坝及基础的性能,监测的重点是右坝肩和下游岸坡⁷。

在拱坝(263个测点)和支墩(62个测点)的混凝土体中,同时在试验室的混凝土梁(18个测点,“特殊试验”)中埋设了与温度计结合在一起的应变计。检查了该坝的正确应力状态和性能之后,这些应变计及早地探测出卡里巴拱坝混凝土有一种缓慢、稳步的不可逆转的演变现象;这种“偏移”在无约束的校正器块和垂直传感器中为最大,在坝体中最大应力的水平方向为最小,或甚至为负,这相当于混凝土收缩或蠕变。值得一提的是33年前在该拱坝中装设的Telemac振动计80%仍在继续运行。

廊道中(2×44个),坝顶水平测桩(44个)下游面上的陶瓷觐标(39个)和溢洪道上游闸墩上(1个)设置的接缝计用于监视该坝。觐标可由10个信号台组成的网络进行观测。南岸发生位移,加上政治问题(实际上使赞比亚和当时的罗得西亚之间的

边界处于关闭状态)使该坝的大地监测非常困难。在南岸的局部地带逐步装设了许多标桩和信号台。

1963年,安装了3个正锤线,监测南岸坝肩。这些正锤线的指示值是最有意义的,但它们中至少有一个(位于支墩下游50m)显然太短。在南岸装设了一系列位移探测钢

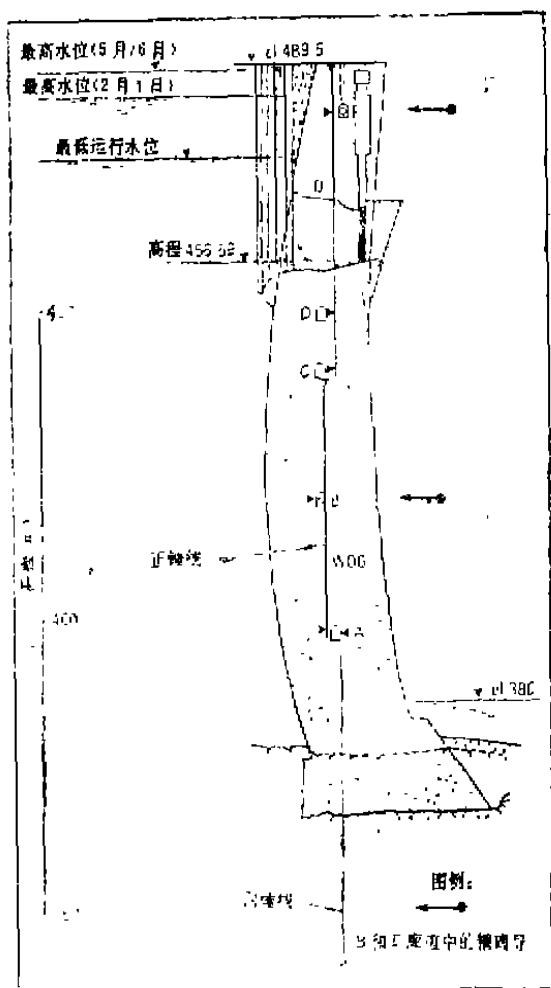


图4 卡里巴坝的标准断面

丝, 监测坚硬和风化片麻岩之间的过渡区的位移(从排水廊道中读取监测值)。实际上这些探测钢丝从未指示出任何大的位移, 尽管目前对它们之间的实际位移推测值较高。

1976年, 在下游滑动带中开挖的勘测竖井中安装了3根倒锤线, 共计10个读数表, 还使用了测斜仪钻孔确定上部滑移面的位置并跟踪地下水位的涨落情况。

在岸坡上, 主要是在滑动体趾部的地下厂房交通洞进口附近和一些平洞中逐步装设了各种裂缝移动销。

各种排水廊道(1988年南岸有11个)可提供一些最重要的数值, 结合降雨和溢洪道放水作定期检查。

对排水孔流量进行单独测量, 1988年4月以前每月一次(现在测量时间拉长了)。排水廊道中有369个测点, 在坝的底座上有12个测点。还对坝下的一些测压计作定期测量。

自1962年以来对水库诱发地震作了记录。地震活动震级太小, 对该坝没有任何影响。

混凝土特性

在七十年代初, 对应变计资料、“特殊试验”资料和坝体混凝土芯样室内膨胀试验资料作了几次分析并定期作了更新修正⁶。在1982年~1983年, 对20多年来收集到的仪表观测资料作了一次全面的综合分析研究, 对该坝的性能进行重新评估^{7,8}。更新修订的曲线图表明, 目前混凝土继续以稳定不变的速度发生缓慢的位移。

除结果分散而外, 发生位移的速度主要与应力的方向和等级有关。典型的位移值(以微米/年计) 10^{-6} /年; 无应力的“校正器”23个单位, 垂直传感器11.5个单位, 倾斜传感器4或5个单位, 水平传感器-1.5个单位(轻微收缩)。应力高于3或4MPa处似乎完全制止了膨胀, 在拉力区膨胀增大,

精密水准测量表明, 坝顶在不断升高, 大致与坝块的高度成正比, 尤其是溢流坝段的上方的坝块高度。该坝的中心升高最大, 现在已达60mm, 即每年升高2mm, 这相当于整个坝高平均升高速度 $18 \cdot 10^{-6}$ /年(除去溢洪道仅 $12 \cdot 10^{-6}$ /年)。

用科因一贝利耶公司COQUEF3有限元模型模拟证明该坝的膨胀是均匀的, 中心悬臂梁坝顶上游位移较大, 这显然不能从大地测量得到了解。但是, 这一位移是在翼坝上观测到的。与此同时, 坝肩结构发生了轻微倾斜, 支墩似乎朝外倾斜张开, 上游支墩朝山体弯曲, 而下游支墩朝河流弯曲。

溢洪道闸墩上游凸缘出现了典型的混凝土膨胀轻微网状裂缝。叠梁固端部位即闸门口槽已发生了一些小问题, 需作特殊的维修处理。

1989年, LCPC—Paris用电子显微镜扫描技术在无应力潮湿环境中搬置了16年以上的该坝的一个混凝土芯样上探测出有典型的骨料碱性反应的膨胀凝胶体(硅-钙碱性胶体)和钙铝矾(水化三硫铝酸钙)存在。补充分析有助于更好地认识这种现象。

目前, 在两翼的锤线之间的坝壳厚度中装设了两个水平岩石计, 每个长6m, 可以对横向膨胀作直接量测。安装三年半以后, 它们分别指示出 $+6$ 和 $10 \cdot 10^{-6}$ /年的膨胀。

设置新的仪表设备

该坝运行20年后进行的综合研究加深了对该坝及基础的性能和主要趋势的认识和了解。研究工作强调, 必须增设观测仪表设备, 以便对坝的性能变化作出定量评价。

科因一贝利耶公司根据法国的监测实践建议在坝体和右坝肩区域设置一整套锤线。负责恢复测量系统的瑞士咨询公司 Walter Schneider AG提出的一个选择方案把精密大地导线测量引入拱坝廊道。两个方案均被

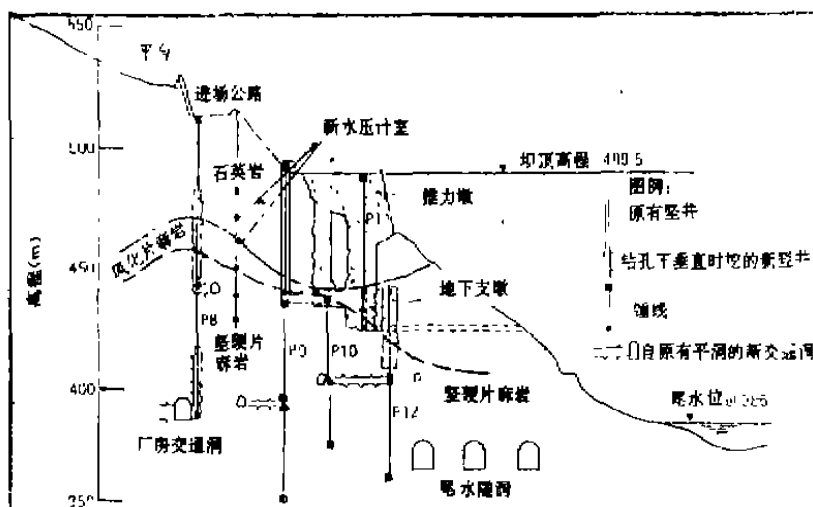


图5 装设新锤线的南岸坝肩上游断面

由南岸坝肩中新的锤线监测值可以得出初步结论,可以弄清这座主要结构物及周围边坡的性能。坝肩似乎没有发生朝河流方向的明显位移。但是,再往下游,50m厚的深层滑体(0.5mm/年)和重叠的15m厚的浅层滑体(+1mm/年)不断地发生微量的边坡位移。见图1。

业主保留接受¹⁰。

实施花了三年时间,涉及在混凝土和/或岩石中钻完全垂直的钻孔,开挖竖井作为选择方案安装锤线和水压计,沿主坝廊道建立无数个大测量站和给整个观测网增加三个新的测量觇标。经过数月的艰苦工作,于1989年中开始读取基准读数。

监测系统包括南岸坝肩中增设的20个锤线和读数表,每月一次读取数据,在附近的31个水压计室和拱坝中的5根锤线(14个孔,25个读数表,每两周一次读取数据)。精密大地测量和水准测量用精密技术和软件系统在坝顶上和两个装置仪表设备的廊道中进行,每年测量2次。

坝体中的锤线提供关于可逆变位的重要资料。其测量值看来与大地测量相当吻合,并指示出正常的静水压力和季节变化。考虑到观测到的长期现象的变化速度极其缓慢,要花好几年才能作出具有足够长度的记录,方能对这些现象作出可靠的解释。自然,这些解释要以H—S—T统计分析为基础,将任何可能的细小变位(时间效应)与所有的静水压力(库水位)和季节(温度)作用区别开来^{11,12}。由于自1989年开始装设监测系统以来库水位下降,尚不能在拱坝上探测出上游的不可逆位移趋向。

补充排水

与1978年观测到的最大值(深层和浅层滑体分别为16和94mm/年)或在1980年成功地采取了稳定措施之后观测到的最大值(分别为3和2mm/年)相比,即使上述移动减小了,这些移动仍没有完全消除。定期维修和南岸表面密封逐步朝山上扩展延伸减少了降雨入渗。为了改善边坡的残余稳定性,以防将大量溢流放水和当地降雨过丰,必须考虑在滑动的石英岩体的中心部位和下游深层滑体底部设置专门的廊道和排水孔作为补充排水。

审查卡里巴南岸续建工程的一个独立的咨询研究组赞同这些建议。

位于423/425m高程的新排水廊道为350m长。在钻排水孔的同时,将对坝及其坝肩下面的整个排水系统作整修。对从底座上钻的旧排水孔和南岸中的各个排水廊道将进行检查和扩孔或重钻以消除老化。还计划使水压计网络现代化并使之扩大。

结 论

自卡里巴坝建设以来已仔细地获取了大量的监测数据和观察观测资料。这些年来,

该工程出现了岸坡稳定性问题。这些问题通过采取补救措施已得到了控制,在八十年代发生的干旱期间这些问题变得不那么危急了。与此同时,拱坝混凝土受到缓慢经常的空间变化的影响。

用于测量混凝土变形和岸坡位移新的仪表监测系统现在处于全面运转中。该系统看来是有效和可靠的,监测表明,尽管附近的下游边坡蠕动,南岸坝肩没有出现失稳移动。但是,正在采取措施以增加安全系数,为配合以前的维修工作,即将开始设置新的排水设施。

大坝安全控制是一个时间问题。它需要保持和提高工程师对工程的设计、历史沿革和演变发展的知识。对工程保持有效的“活的记忆”有助于全部参与人员认识监测探测出的演化发展,与以前对建筑物性能的知识结合起来进行判断,并对未来作出预测,以便及早采取足够的安全措施。

卡里巴坝建成以后的33年,咨询公司档案库中的文件占满了33m长的资料架,业主办公室里的文件资料甚至更多。原来参与建设该坝的大多数工程师已退休,调往其它地方工作或已经去世。如在本文中所看到的那样,定期地将技术资料和历史背景结合起来

作综合分析研究更新了对该坝的认识,有助于该坝的安全。

参考文献

1. CRUPET, A., "Le barrage de Kariba sur le Zambèze", *Annales I.T.H.E.P.*, No 132, December 1958.
2. ANDREWS, D., PATON, J. A. J. AND BUCKLE, R. C., "Zimbabwe Hydro Electric Development at Kariba, First Stage", *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Paper No 6479, vol. 37, September 1960; with Discussion and additional comment by Mr. Paton, vol. 21, March 1962.
3. SANTA CLARA, J. M. A., "The complex geology of Kariba's right bank", Q66-R14, 17th ICOLD Congress, Vienna, Austria, 1991.
4. GIRAULT, B., "Commentaires sur le R 14 et hommage à André Coyne", Q66-R14, Discussion, 17th ICOLD Congress, Vienna, Austria, 1991 (note: photos pages 397 and 399 backwards).
5. SANTA CLARA, J. M. A., "The Hydrological operation of the Kariba hydroelectric scheme: past, present and future", Q63-R29, 16th ICOLD Congress, San Francisco, USA, 1988.
6. MASON, F. L. AND ARUMU, K., "A review of 20 years of scour development at Kariba Dam", 2nd Int. Conf. on hydraulics of Floods and Flood Control, Cambridge, England, September 1985.
7. SANTA CLARA, J. M. A. AND IZZET, I. P., "The dam and foundation monitoring system at Kariba", Q56-R54, 15th ICOLD Congress, Lausanne, Switzerland, 1985.
8. "Kariba dam, Swelling of Dam Concrete", *Gibb Coyne Siegel (Kariba)*, January 1975.
9. "Kariba Dam, report on Dam behaviour", Coyne et Bellier, September 1983.
10. SANTA CLARA, J. M. A., "Additional instrumentation for the safety monitoring system of the Kariba Dam Wall and its foundations", *Zimbabwe Engineer*, January 1987.
11. GIRAULT, B. AND OZANAM, O., "Solutions for integrated dam monitoring systems", *Water Power and Dam Construction*, November 1989.
12. GIRAULT, B. AND CRUPET, J. M., "Monitoring dams and their foundations", 1st Conference Research Needs in Dam Safety, New Delhi, India, December 1991.
13. "Kariba South Bank Review", Knight Piésold Consulting Engineers, July 1991.
14. DEKISZET, J. AND GIRAULT, B., "La maintenance du savoir sur les ouvrages en exploitation: l'expérience internationale d'un Ingénieur-Consultant", Discussion Q65-23, 17th ICOLD Congress, Vienna, Austria, 1991.

向世武 译