

埃德混凝土重力坝的战争破坏与重建

王 静¹, 曹为民², 朱岳明³

(1. 水利部长江水利委员会, 湖北 武汉 430010; 2. 水利部淮河水利委员会, 安徽 蚌埠 233001;

3. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:对20世纪初修建的德国埃德混凝土重力坝在二战期间遭英军空袭的破坏和其后所进行的重建工作进行了较详细的介绍。该坝遭专制的重磅炸弹夜袭后, 大坝受到严重破坏, 坝中形成一个大的半椭圆形缺口, 坝体被松动, 缺口周围开裂严重, 出现了众多水平向延伸的裂缝。其后该坝得到了砌石、灌浆、设置排水幕及排水廊道等的重建工作, 及时、成功地进行了加固。

关键词:埃德混凝土重力坝; 战争破坏; 重建; 加固; 灌浆; 德国

中图分类号:TV642.3

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2002)02-0066-03

德国埃德(Eder)重力坝修建于1911~1914年, 耗资2400万马克。库区流域面积1430 km², 库容2.02亿 m³, 坝高47 m, 坝基宽36 m, 坝顶宽4 m, 坝顶长400 m。约在大坝的2/3高度处, 布置有12个紧急泄洪中孔。左岸建有I期水电站, 右岸布置泄洪底孔和后来于1928年扩建的II期水电站。坝基岩体为硬而密的灰色砂岩和泥板岩, 坝体由砂岩人工破碎骨料和石灰质火山灰浆修建而成。

为了防止库水渗入坝体, 坝的上游面抹有一层厚2.5 cm的水泥石灰质火山灰浆, 其表面再加一层化合物防渗层, 然后表面再被厚为0.75 m的与坝体有燕尾榫连接的混凝土层保护着, 防止冻融和阳光照射的侵害以及库区物体的撞击等。尽管有了这些防渗措施, 在坝体防渗体后面1.5 m处以及在坝下游面都设置了垂直排水幕。在大坝的计算中, 不考虑坝体扬压力, 得到当时瘦小的坝体剖面(图1)。同样, 通过一系列的措施, 也未考虑坝基扬压力的作用。主要措施有: 坝上游面有截渗齿墙, 库底有宽30 m、厚1 m的粘土铺盖, 沿坝建基面有6道纵向抽排水廊道。

1 空袭破坏

在二战期间, 为了轰炸德国位于Moehne, Sorpe, Eder河上的3座大坝, 英国特地成立了一支空军轰炸联队, 进行专门训练, 于1943年5月16日至17日的夜晚对这3座坝进行了轰炸, 用的是特制的炸弹, 个体重达3.9 t, 圆柱形, 横向挂在机体下方, 在掷投前炸弹通过特制的装置处于旋转状态, 在接近大坝时被投到水面上, 向着大坝边滚边沉, 并通过深敏器使炸弹

在最佳深度处引爆。在先对Moehne混凝土坝和Sorpe土石坝进行轰炸后不久, 就对埃德坝进行了轰炸, 那时大坝正好满蓄至堰顶高程, 库容达2.02亿 m³。第一颗炸弹落得迟了点, 但仍正好落在大坝左岸圆柱墩高架的路面上, 对真正的坝体没有造成危害。然而爆炸力是巨大的, 把坝顶50多 m长的由块石砌起的厚胸墙全部炸飞了。第二颗炸弹仍未投中, 落在了右岸上游近坝址的山坡上, 对大坝未造成损害。但第三颗和最后一颗炸弹“按计划”正确地落在坝前水面上, 边滚边沉地靠近大坝, 在大约20 m的最佳水深处引爆。

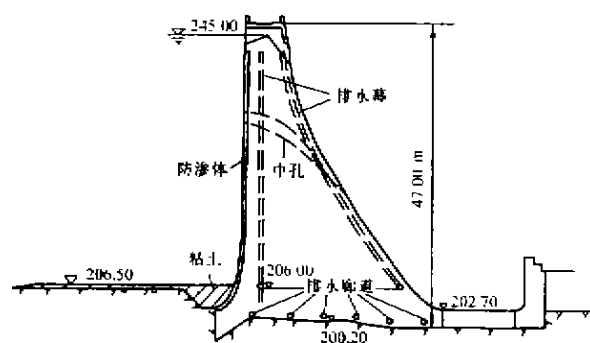


图1 空袭前的埃德重力坝剖面

爆炸直接造成坝体有一个大炸口, 周围坝体严重松动, 高速水流撕裂坝体, 形成一个顶部宽60 m、深22 m的半椭圆形大缺口, 坝体水平向出现了许多裂缝, 大约从水库中放出1.60亿 m³的水, 坝后消力池中绝大部分防冲墩被撕裂冲走, 巨大的水体能量将基岩冲成一个深达10 m、直径80 m的冲刷坑, 坝基被掏空。在冲刷坑的周围, 散落着从坝体破碎下来的单块体积达6 m³的混凝土块体, 大约12000 m³坝体

作者简介: 王静(1960—), 女, 山东平原人, 高级工程师, 主要从事水工结构工程和建筑结构工程的设计与研究。

被炸掉,缺口处坝底厚度只剩下 18 m。此外,在大坝的下游面,除了上面已提到的消力池中的防冲墩外,连接Ⅰ期和Ⅱ期厂房的交通桥、Ⅱ期厂房底孔前直角消力池的围墙以及两个厂房前的岛山的大部分都被炸飞了。幸运的是,位于大坝两岸的厂房仍然存在,尽管其中的机器和电器设备已受到爆炸和淹没的损坏。坝下游面发电引水洞和紧急泄洪洞的闸门也被破坏了。在库区两岸,由于水位的骤降,有 5 处较大的滑坡,以及有许多处较小的岸坡破坏。由于水量的流失,库区绝大部分鱼类也遭到毁灭性的破坏。

大坝遭炸后,坝址最大流量达 $8\,500\text{ m}^3/\text{s}$,浪高 9 m 多,洪峰流量是该河自然洪峰流量的 9 倍,下游河谷遭到巨大的冲刷破坏。埃德河左岸的沿河公路被冲垮,对山体坡脚的冲刷引起距坝址 1 km 远的山体滑坡,导致沿山公路有约 150 m 长、2 m 深的下滑沉陷。下游平衡池的沿谷向展延的 3.3 km 长的土坝被洪水冲得只留下 3 段总长仅为 500 m 的残体。坝下游沿河村镇中的许多房屋和多座跨河桥梁都被冲垮或严重损坏,有 68 人死亡,许多牲畜被洪水淹死。坝下游大约有 80 km^2 的土地遭到沙漠化,不是被剥去了母土,就是被覆盖上了碎石。

2 大坝的重建

大坝被炸后,当局除了采取广泛的防空措施外,马上进行了大坝的重建工作,以最快的速度进行了该坝重建工作的设计、研究和相应的前期工作。幸运的是,工程管理机构的设计和设想都得到了落实,没有采用一个当局出于宣传所需而被推出的、并要迅速建成的临时性解决方案,而是制定了一个长期有效的理论上无异议的重建方案。通过详细的研究和设计,坝体的主要重建措施有:

a. 对炸口周边形成齿状结构,以使坝体新老混凝土有牢固的结合。

b. 对炸口进行砌筑,要求砌体与原坝体在外观上尽可能地相似,达到新老坝体统一和谐的结构特性,以及砌体要有尽可能高的抗渗能力,为此要尽可能小地限制新筑结构的干缩变形,放弃常规简单的混凝土筑坝方法,宁可延长施工期。经过压水试验,发现一种既能防渗又与老坝体很相似的砂浆材料。据此,得出应采用与筑原坝时相同的砂岩石来修补的结论。

c. 新筑坝体上游面的防渗方法与原来的相同,即一层抹灰、一层涂层和一层坝表面 0.75 m 厚的砂浆混凝土保护层。此外,设置一道沿破坏线分布的排水管道。在大坝原设计中,假定坝体内没有渗透水压力,但是大坝遭炸后,坝中产生了无数的裂缝,防止坝体内出现水压力,须采取下述多项工程措施。

d. 对余留的老坝体进行水泥灌浆。因为除了从外面能看见的裂缝外,坝体内部肯定还存在许多看不见的裂缝,几乎对整座坝上游面大约 $5\,500\text{ m}^2$ 的面积都进行了一个完整的灌浆孔系的布置与灌浆。假定单孔灌浆影响距离为 1.5 m,孔间的水平向和垂直向距离均为 2 m,每个孔摊到 4 m^2 的灌浆区,将总共约 1400 个孔都布置成与水平线成 30° 的角,隔排向上或向下钻孔,通过这样的钻孔布置,可确保每条不管它怎样分布的裂缝至少会被一个钻孔穿过和被灌上浆材。出于技术上的原因,仅仅是位于最底排向上布置的灌浆孔无法钻成,得用水平钻孔来代替。在坝踵区钻孔的方向特别重要,加设了许多向下布置的斜孔。坝体的灌浆厚度确定为 6 m,另外考虑到钻孔的偏斜和坝上游面有 0.75 m 厚的防渗层,最后决定孔深 8 m,孔径 60 mm。

在灌浆前对钻孔先进行压水洗孔,压力达 300 ~ 400 kPa,去掉孔中的碎杂东西的同时也使坝体得到了充水饱和。灌浆时用的是净水泥浆,水灰比根据裂缝隙宽大小来确定,隙宽的大小是根据压水洗孔时的观察来确定的。当用纯水泥浆无法达到填密时才在浆液中添加砂料,用的都是粒径小于 1 mm 的细砂。灌浆压力达到 608 kPa,灌浆持续时间据吃浆量情况而定,灌浆顺序自下而上。

在灌浆过程中发现灌浆孔时有穿过坝上游原来的排水孔,部分浆液流入原来的排水孔中,在确定坝体吃浆量时必须从总吃浆量中扣除这部分,坝体吃浆量平均约为每 1 m^3 坝体吃进 2.4 kg 的水泥材料。灌浆后在坝上游面钻检查孔,进行压水试验,评价灌浆效果,坝体是否真正达到了预期的填密效果,检查孔的平均吸浆情况仅为每 1 m^3 坝体 0.18 kg 水泥,表明坝体灌浆达到了事先的要求。

灌浆时不可避免地会导致局部区排水孔的堵塞,且堵塞程度事先不知道。只能假定灌浆后坝上游面的排水孔不能很好地完成它们的排水任务。鉴于大坝的安全性对坝体排水实施的高度敏感性,只得完全放弃考虑坝中原有的排水系统的作用,尽管这样做的代价很大。

e. 对河床中间坝段布置新的排水幕,距坝上游面防渗层 2 ~ 3 m,孔距 1.5 ~ 2.6 m,孔径 15 cm,从坝顶垂直向下钻孔。这些垂直排水孔将渗透水导向坝基新建成的纵向基础廊道。为了能排走坝基及坝建基面上的渗透水流,这些排水孔穿过廊道直至基岩中,孔深达 45 ~ 50 m。在排水孔造孔过程中,尽管采取了种种预防措施,钻孔仍未能按要求完全做到垂直。在基础廊道处许多钻孔偏离了事先指定的位置,有少数钻孔从廊道旁边滑过。为了这部分排水孔也

能起到排水作用,不得不再用水平孔连接,需要知道它们在坝体内的具体位置.一方面将防水探头沿孔放入孔内,释放出干扰波,另一方面在廊道内安装一个框架式无线接收器,接收干扰波,将接收器安置在多个不同的位置就能精确地确定钻孔的具体位置,用一个常规水平钻孔就能与它交叉连通.

f. 在基础廊道的施工过程中,由于技术上的原因,坝上游面最底层应向上打的斜孔没有施工,这会相对地增加这部分区域渗流量.对此,从廊道里向廊道上游面和顶面进行钻孔和灌浆.对坝踵部位进行了大量的灌浆工作,以密实这部分坝体.对坝体被振松的区域采取固结灌浆,沿炸口周边进行辐射状钻孔灌浆.

g. 对坝基岩体和坝建基面也进行了灌浆处理.对基岩灌浆时第一组灌浆孔的灌浆压力为 600 kPa,此后的灌浆孔采用了 1.2~1.5 MPa 的灌浆压力.在灌浆过程中,一开始尽管做了最大的努力,仍未能使得坝基中可能存在的裂缝及空洞都被有效地灌到,原因是有些灌浆孔与位于坝上游面坝建基面上原有的排水幕中的 3 道排水通道相连,浆液经过这些排水通道流失掉了,这个现象可以无疑地从排水通道的出口处得以确认.经过对这些通道的封堵后,坝基才得到了密实.此外,灌浆后坝基上游面 3 道基础排水洞失效了,需采用别的排水设施来替换它们,在它们的附近进行了前述 e 点中所提到的垂直排水幕的施工.

上述重建工作花费了大量的精力,投入了特别的劳动力和机械设备.炸口的封堵在 1943 年 9 月底完成,连同前期工作仅仅花了近 4 个月的时间.随后进行了 3 个月的灌浆工作,至 1944 年 6 月底完成了全部新挖的纵横向排水廊道和排水幕的施工(图 2).坝体炸口的封堵用掉了 13 000 m³ 的碎石砌体材料,灌浆钻孔长度超过 12 000 m,灌入的水泥近 150 t,新的排水幕钻孔总长 5 500 m,坝体内纵横向廊道长达

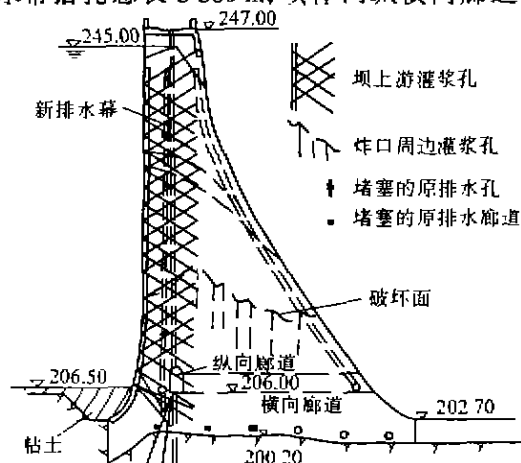


图 2 重建后的埃德重力坝剖面

280 m.炸口下游冲坑用 140 m 长的铁板桩隔墙进行阻隔与连接,冲坑区通过基础砌体对坝基进行加固.左右岸两座厂房之间的缆索与交通桥梁以及厂内机械设备都得到了重建.此外,还完成了许多别的辅建工作,对库区上游的滑坡、沿江公路、下游调节水池溃决的土坝以及被冲垮的所有跨河桥梁等都进行了重建或修补工作.大坝重新启用后,除了某些局部补充工作外,运行正常.

3 结 语

埃德重力坝修建于 20 世纪的 20 年代,在坝工技术发展史上处在现代筑坝技术的“初期”阶段.但若用现代的坝工知识来衡量,该坝的设计工作仍做得非常细致、准确.为了确保坝体中没有渗透压力和扬压力的要求,在大坝的上游面专门设置了较复杂的防渗结构,其后又设置了排水幕.同样为了控制坝建基面上的扬压力,设置了 6 道纵向基础抽排水廊道.在今天看来,就这些方面也仍然是这么做的,它们确实能满足坝体内和坝建基面上无扬压力的要求,非常了不起.

大坝遭轰炸后,德国人对大坝重建工作中的那些种种工程措施进行了精细而又周到的设计和施工,这种科学的态度和实事求是的精神在今天仍是值得回味的,为该坝重建后的正常运行提供了技术保障.

迄今为止,遭到战争破坏的混凝土坝很少,但战争期间挡水坝会成为敌方要破坏的重要目标的可能性仍是一个存在的很现实的问题.最近美国在反恐战争中就对阿富汗某水电站工程进行了轰炸.笔者希望本文会在一定程度上加深人们对这一问题的认识 and 了解.

参考文献:

- [1] Seemann D. Die Kriegsbeschädigungen der Edertalsperrmauer, die Wiederherstellungsarbeiten und die angestellten Untersuchungen ueber die Standfestigkeit der Mauer (I) [J]. Die Wasserwirtschaft, 1950, 41 (1): 1 ~ 7.
- [2] Seemann D. Die Kriegsbeschädigungen der Edertalsperrmauer, die Wiederherstellungsarbeiten und die angestellten Untersuchungen ueber die Standfestigkeit der Mauer (II) [J]. Die Wasserwirtschaft, 1950, 41 (2): 49 ~ 55.
- [3] Bundesanstalt fuer Wasserbau. Gutachten ueber den Zustand und die Standsicherheit der Edertalsperre [R]. August 1988.
- [4] Corinth E. Die Ederstaumauer-Geschichte, Bau und bisherige Instandsetzungsmaßnahmen [R]. Lehrstuhl und Versuchungsanstalt der TU Muenchen, 1990.

(收稿日期:2001-09-14 编辑:马敏峰)