

世界上最深混凝土防渗墙的施工及观测

——访加纪实之二

王 民 寿

(四川联合大学, 成都, 610065)

笔者在赴加拿大访问、考察期间,除了对加拿大的能源建设、电力开发、高新技术和科学研究等方面进行了解外,也对一些具有特色的水工建筑物的施工进行了较为深入地了解。有些工程施工虽然也时过境迁,但由于仍可供我们借鉴,故不妨加以介绍。本文所介绍的墙深世界第一的马尼克-3主坝混凝土防渗墙施工,便属于这种情况。

1 工程概况

加拿大对大坝深厚覆盖层基础防渗处理多采用垂直防渗方案,在近二三十年修建的大坝尤以采用混凝土防渗墙居多。加拿大的混凝土防渗墙施工技术最初是从法国和意大

利引进,实际应用中有一些改进和发展,并于1972年建成了至今仍是世界上最深的混凝土防渗墙。该工程便是墙深131m的马尼克-3主坝的混凝土防渗墙。

马尼克-3(Manic-3)水电站装机容量 6×19.6 万 kW,位于流经魁北克省的马尼夸根河(Manicovagan river)上。为堤坝式水电站,设计水头94.5m,主坝是冰碛土心墙坝,坝高108m,坝顶长395m,坝轴线呈向上游凸起的坦拱,曲率半径为620m。该坝基础覆盖层厚达130m,覆盖层上部有较大范围的细砂层,靠基岩处粗颗粒多,且其中夹有直径1m以上的大孤石。砂砾石层的渗透系数为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/s,就整体而言,无明显分层和不均匀性。该坝河槽地质横剖面如图1所示。通过

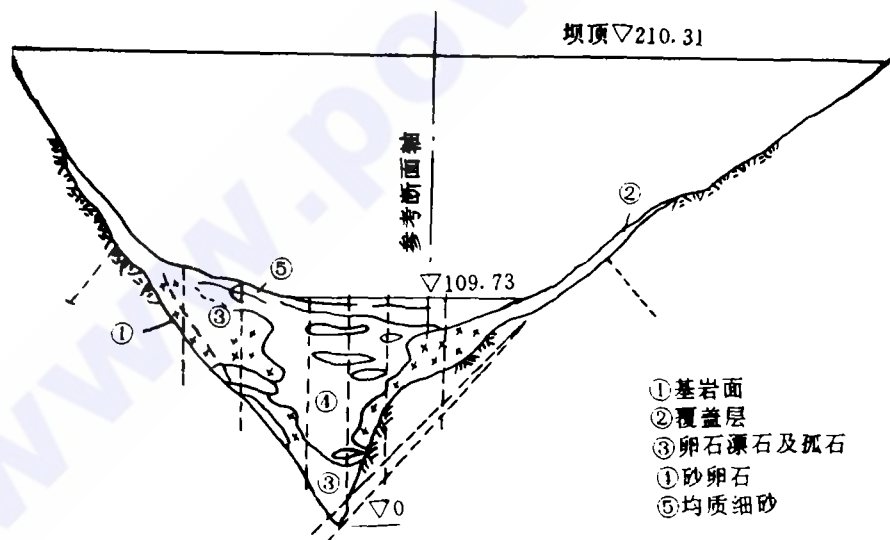


图1 马尼克-3主坝河槽横断面图(高程单位:m)

技术经济比较,考虑技术上实现的可能性和可靠性,认为该坝宜采用垂直防渗。鉴于覆盖层中含有大量细砂,不适宜采用高压帷幕灌浆,故最后决定采用了混凝土防渗墙作为坝

基的防渗方案。
马尼克-3主坝的标准设计剖面如图2所示。坝基共布置两道混凝土防渗墙,最大墙深131m,墙厚上下均为61cm,两墙中心间距

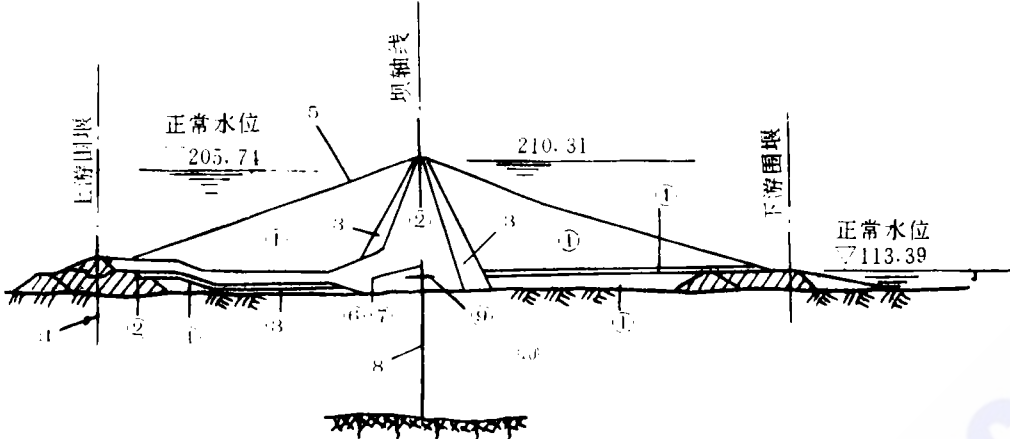


图2 马尼克-3主坝标准断面图(单位:m)

- ①碾压坝壳透水料;②碾压冰碛土;③过渡层;④排水层;⑤抛石坝面;⑥本脱土层;⑦基础廊道;
⑧主防渗墙;⑨钢板隔水层;⑩覆盖层;⑪上游围堰防渗墙。

3.2m,墙的中心线和坝轴线一样呈坦拱向上游凸起,以利于在承受水压时,各墙体单元接缝压得更为紧密,有利防渗。混凝土防渗墙顶长约200m,两道墙体总面积为20 740m²,墙顶插入冰碛土心墙12.2m。在墙顶建有一条灌浆兼观测用廊道,高×宽为3.1m×2.45m,衬厚为62cm。为了在廊道顶部形成一个应力扩散区,在其顶部设计了一个宽3.1m,厚6.2m含水量大于塑限的缓冲土层区。在廊道顶部每隔2.1m安装管径为15cm的管道。当坝体应力值超过设计限制时,通过这些管道灌

渗墙顶上游15m,下游9.12m 范围内,设有四层每层厚3.2mm 的水平钢板层,板的两面均涂有沥青,形成可滑移的接头。板与板间搭接长度不少于板长的 $\frac{1}{4}$,且和廊道的外部轮廓搭接。该廊道和基础廊道结构如图3所示。

混凝土防渗墙底嵌入基岩的最小深度不

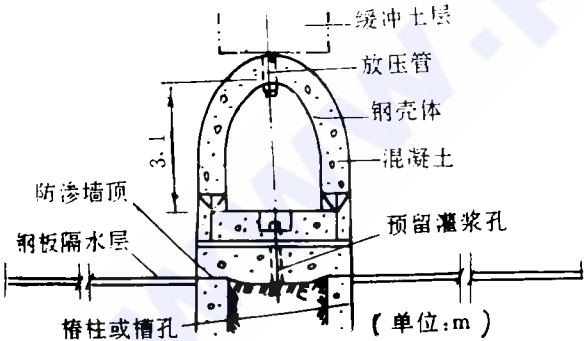
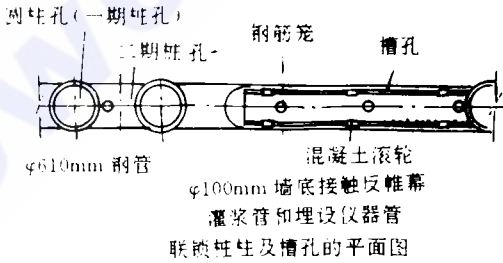


图3 马尼克-3主坝防渗墙顶部及基础廊道构造图

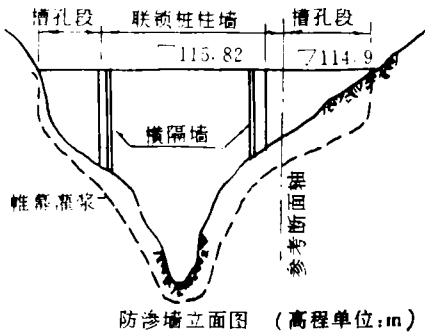


图4 马尼克-3主坝防渗墙平面及立面图

小于墙厚。防渗墙内预埋直径100mm 塑料或钢灌浆管。在基岩渗透系数大于 10^{-3}cm/s 部位均进行帷幕灌浆,而墙底和基岩接触部则全部进行接触灌浆。

河槽部分墙深大于52m 部位采用联锁桩柱,两侧为槽孔,前者截水面积为 $7\,680\text{m}^2$,后者为 $2\,920\text{m}^2$ 。在两种型式墙接头近处的联锁桩柱墙段内,做了两道顺河流向的横隔墙,于是把防渗墙分为三个区段,布置如图4所示。

联锁桩柱段共有一期孔76个,二期孔77个;右岸槽孔段12个,左岸槽孔段20个。大坝混凝土防渗墙用坝内防渗铺盖和上游防渗墙连接,构成一个更为完整的防渗系统。

2 混凝土防渗墙的施工

马尼克-3坝混凝土防渗墙的造孔和浇筑都在具有混凝土面层的工作平台上进行。该面层和槽孔孔口的定位导墙连成一体,面层上布置钻机轨道和供水供浆管路及其它施工附属设施。面层混凝土保证了槽口的稳定,且有利于减少钻孔时的垂直偏斜度。在零下 30°C 的寒冬中施工、搭设高14m 的暖棚钢架,都在混凝土面层工作平台上进行。

2.1 造孔

河槽槽孔段和靠两岸的联锁管桩段施工各具特点:

2.1.1 河槽槽孔段造孔 槽孔段主要用抓斗造槽孔。在一期槽孔两端,采用冲击钻机先造圆孔,作为抓斗造孔的控制边界。在两端圆孔中有时还先放入 $\varphi 610\text{mm}$ 的钢管,有利于两端接头更整齐。槽孔的中间部位一般有2~3个孔位抓除。通常在浇完一期混凝土在槽孔两端预留圆孔,使二期造孔时抓斗可直接造孔。造孔过程若遇见大孤石或坚硬岩石均需用冲击钻击碎。为了简化造孔工序,专门制造加工了造孔设备。如用带有导向加重块的6t 抓斗(见图5),在坚硬地层上造孔。曾经采

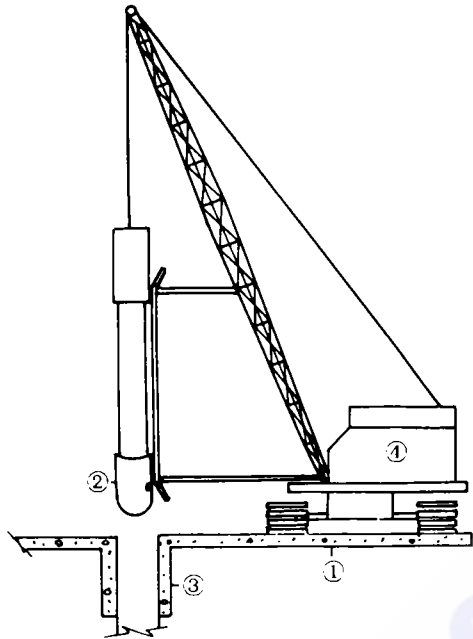


图5 6t 钢丝绳抓斗

①施工基台;②钢丝绳抓斗;③导墙(孔口);④45t 起重机。

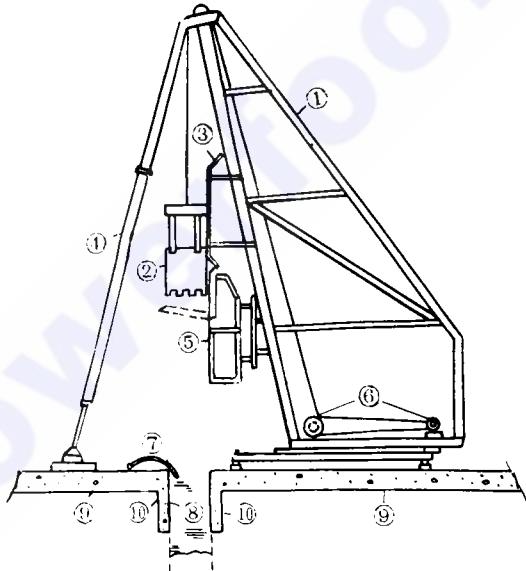


图6 瓦尔康型

①钻塔;②钢丝绳抓斗;③抓斗导向架;④可调支架;
⑤带有可调斗口的卸料斗;⑥卷扬及电动机;⑦供浆管;
⑧泥浆;⑨施工机台;⑩孔口导墙。

用上部带导向杆的液压斗门抓斗,无论那种设备均要求利用冲击钻钻进通过坚石和孤石部位。两种造孔设备钻进效率都很低,后来改用既有抓渣又有接渣,带三脚操作架的瓦尔康型抓斗,生产效率有提高,其结构如图6。

2.1.2 联锁桩柱段造孔 这段造孔用钻头 $\varphi 720\text{mm}$ 的冲击钻造孔,再将 $\varphi 610\text{mm}$ 壁厚 12.5mm ,长 16.7m 的无缝钢管打入孔内,既保护孔口又作导向管用。为了减小造孔的偏斜度,采用了不同于一般钻头的导向套筒钻头。该钻头在 $\varphi 610\text{mm}$,长 5.9m 的六角扩孔钻头中,增加配置 $\varphi 250\text{mm}$,长 4.6m 的导向钻头。这两个钻孔均可各自独立造孔。钻进时,导向钻头在扩孔钻头导向下超前往下多钻进 3m ,随后扩孔钻头再沿导向钻头位置扩孔钻进,如此互动导向,容易使钻孔的偏斜度不超过允许值,如图7a、b所示。

钻孔时,用接在导向钻头上的泥浆管送浆,正循环出渣,每钻孔钻进 7.2m ,利用一根能自动卡在孔底钻头上的钢丝绳测一次孔斜,以便分段纠偏。如孔偏超过允许值,要求回填混凝土后重新造孔,施工中共测孔计 $1\,814$ 次,其中仅 1% 不合格。最大偏斜度为 76

cm,由于及时纠偏,孔斜不随造孔深度而发

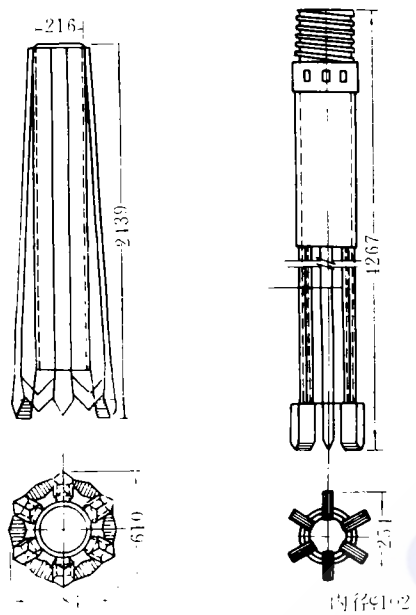


图7a 导向套筒钻头扩孔 图7b 导向套筒钻头导向钻头部分(单位:mm) 向钻头部分(单位:mm)

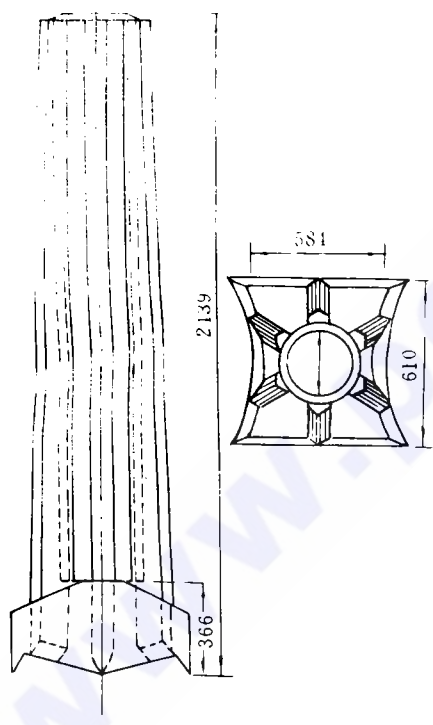


图8 钻二期桩孔用的弧形钻头(单位:mm)

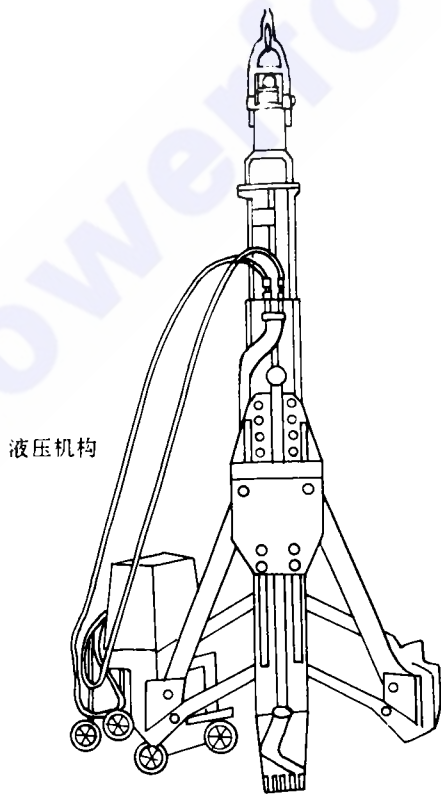


图9 二期桩孔清孔用的油压可张式钻头

展。70年代末,加拿大在另一些工程采用激光定位,保证造孔的垂直更为理想。

槽孔与槽孔间连接部位,待相邻一期孔回填混凝土后,再采用中心带有导向钻头、两侧为圆弧形的弧形冲击钻头,如图8所示。采用正循环泥浆造孔、将槽孔连接部位的覆盖层冲击掉。待终孔时再用如图9所示的一种液压可扩张式钻头清理孔壁。这种钻头平面形状与弧形钻头相同,其两侧刃由活动壁支撑,由液压系统调整其开度,使钻刃任何时候都紧贴一期孔壁,在冲击过程中冲掉桩柱壁面上残留的覆盖层和过厚的泥皮。可张式钻头底部中部钻刃两边都有斜向喷浆口,在造孔时,泥浆直接冲至侧刃工作面,侧刃可调开度为0.6~1.0m,造孔采用正循环出渣。

图10表示上下游墙间连接的横隔墙施工,造孔结束后在B处放一根直径610mm钢管,待A区浇筑完混凝土,再浇B区混凝土,边浇边拔B管。

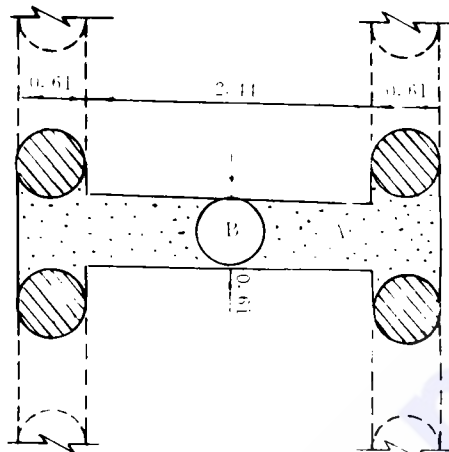


图10 横隔墙施工示意图(单位:mm)

对槽孔和联锁柱墙的连接部位,可调整槽孔长度。同时把槽头冲成圆弧形,用圆弧形钻头造孔,使接头孔和二期桩孔吻合。联锁桩柱墙施工程序如图11所示。

造孔中采用泥浆固壁,泥浆用加工后的袋装膨润土加19倍水拌制。泥浆成本高,故用循环向孔内充浆方式,回浆经净化再重复使用。泥浆性能指标如表1。

造孔冲孔后,用反循环清理孔底,通过回浆管抽出浆中混杂的石渣和稠度过大的浆液及泥团,直到孔内浆液达到表1所规定的各项指标后,方能在浆下进行混凝土浇筑。在漏浆严重的地层,为了减少泥浆损失,常在泥浆中加入锯末及玻璃纸屑,这样有助于在孔壁形成致密的泥皮,阻止泥浆漏失。

表1 防渗墙造孔泥浆技术指标

比重	粘度(s)	pH值	含砂量(%)	失水量(ml)	泥皮厚(mm)
1.01~1.05	39.2~45.7	10.05~9.15	0.24~1	14.5~20.92	0.73~1.57

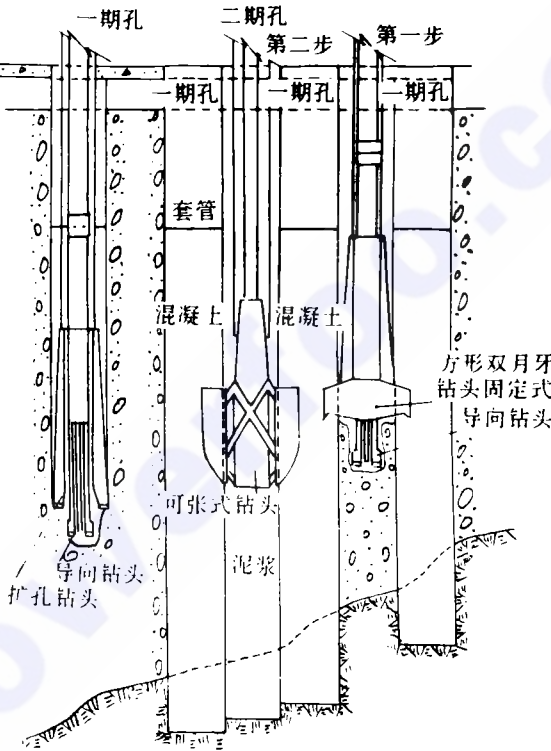


图11 联锁桩柱墙施工程序示意图

若将施工准备时间扣除作为纯钻工效,其工效两岸槽孔造孔如表2,一二期锁桩柱造

表2 两岸槽孔造孔纯钻工效

造孔部位(m) (沿孔深)	造孔工效(m/台时)	
	右岸	左岸
0~30.5	0.67	1.32
30.5~基岩面	0.28	0.41
嵌入基岩	0.04	0.64

孔如表3。

表3 一、二期联锁桩孔纯钻工效

造孔部位(m) (沿孔深)	造 孔 工 效(m/台时)	
	一期桩孔造孔	二期桩孔造孔
0~30.5	0.55	0.74
30.5~60.1	0.45	0.36
60.1~90.2	0.26	0.23
90.2~120.2	0.19	0.21
102.2~基岩	0.09	0.11
嵌入基岩	0.13	0.10

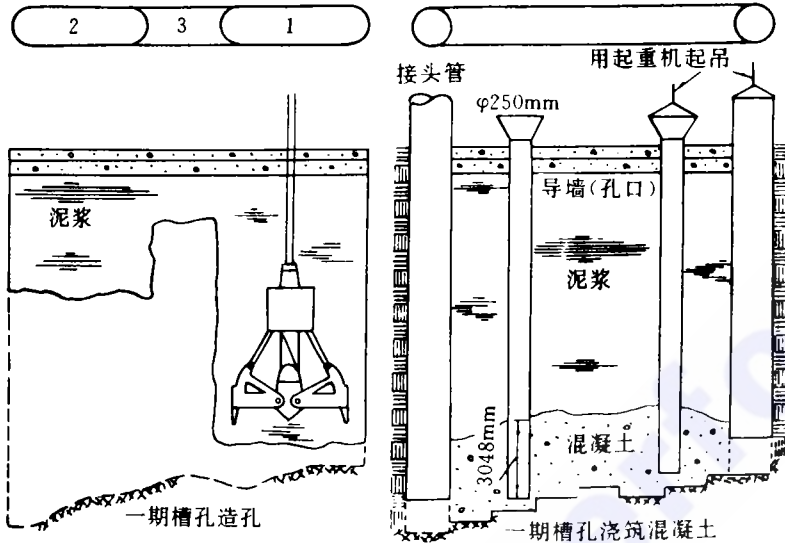


图12 一期槽孔抓斗造孔施工与浇注示意图

防渗墙为平衡两侧心墙填筑时填土和机械的水平推力,在槽孔段墙顶以下17.6m范围内放置钢筋笼。而在联锁桩柱内,把一期槽孔孔口段的导向16.7m长的钢管直接浇入混凝土内,既节约了拆除工料消耗,又起到加固墙身的作用。

混凝土墙浇筑完后,在墙的上下游侧自施工平台下挖12m,进行上部墙体混凝土施工质量检查,对于起伏大于0.3m的鼓包加以铲平。经检查有两条接缝质量不良,采取清挖后重新回填措施。其中有一条缝一直延伸到开挖面以下,于是在缝的附近钻了5个孔进行水泥化学灌浆处理,对槽顶因污染、损伤、不合要求的0.3~1.2m范围内不合格的混凝土进行清除。清理后,重新浇筑至设计高

2.2 防渗墙混凝土浇筑

无论是槽孔还是桩孔都采用导管提升法,在泥浆下浇筑混凝土,导管直径为200~300mm,导管出口埋入混凝土中约3.1m,随混凝土面上升而逐步提升套管。一期槽孔造孔及混凝土浇筑如图12所示。

防渗墙混凝土设计强度(28d)为34MPa,施工实际强度为27~48MPa。最大骨料粒径1.9cm,坍落度12.7~20cm,使用普通水泥作混凝土胶结材料,不掺附加剂。

度。

在防渗墙中心每隔1.2m,预埋有φ100mm的塑料管作为灌浆使用。墙的底部每根灌浆管都进行接缝灌浆,每隔一根管为进行基岩帷幕灌浆的灌浆管,视实际需要进进行帷幕灌浆。

防渗墙底面进行接触灌浆时,设计灌浆压力为墙上水头的 $\frac{1}{2}$ 。灌浆平均耗灰量约为59kg/孔,个别达3600kg/孔,帷幕灌浆沿墙轴线3m一段。灌浆时,孔口平均压力为0.62MPa,平均水泥消耗量为13.2kg/m,最高达62.5kg/m,两道混凝土防渗墙的吃浆量比较接近。

整个混凝土防渗墙施工,从造孔到混凝土全部浇筑完,共花了22个月。施工质量优

良。

3 防渗墙的运行工况观测

为了监测混凝土防渗墙的运行工况，马尼克-3主坝的混凝土防渗墙在施工过程中埋设了大量观测仪器。观测系统运行良好，记录资料完善，反映规律性强。仅就该工程的观测问题，曾在国际大坝会议上作过系统的介绍，引起与会者极大的兴趣。

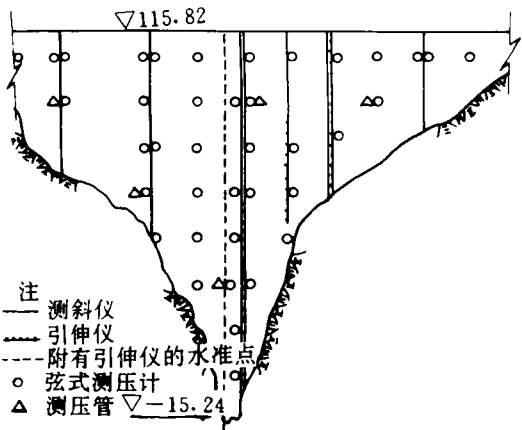


图13 上游墙仪器埋设布置图(高程单位:m)

马尼克-3主坝防渗墙右岸及左岸槽孔段分别设置了2个和3个观测断面，在防渗墙中间联锁桩柱编号为01的桩柱内埋设了仪器，

3.1 观测仪器埋设

表4 马尼克-3主坝防渗墙内埋设的观测仪器

仪 器 名 称	上 游 墙 (件)	下 游 墙 (件)
弦式测压计	9	39
测 压 管		5
电测应变计	165	54
附有电测应变计的水准点	3	1
管式测斜仪	3	5
剪力破坏测定仪	10	
埋设仪器总数	190	104

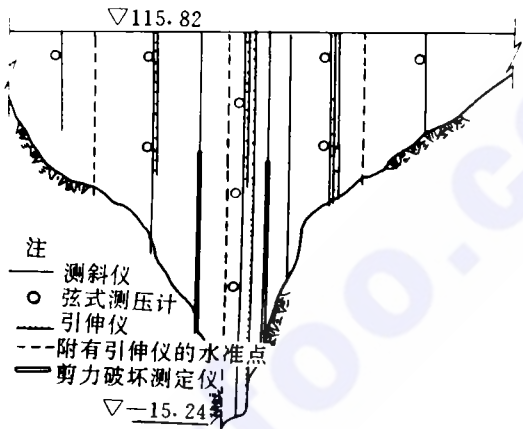


图14 下游墙仪器埋设布置图(高程单位:m)

共埋仪器294件，重点对水压、土压及墙体变形进行了系统观测。仪器埋设部位如图13和14。埋设仪器分类数量如表4。

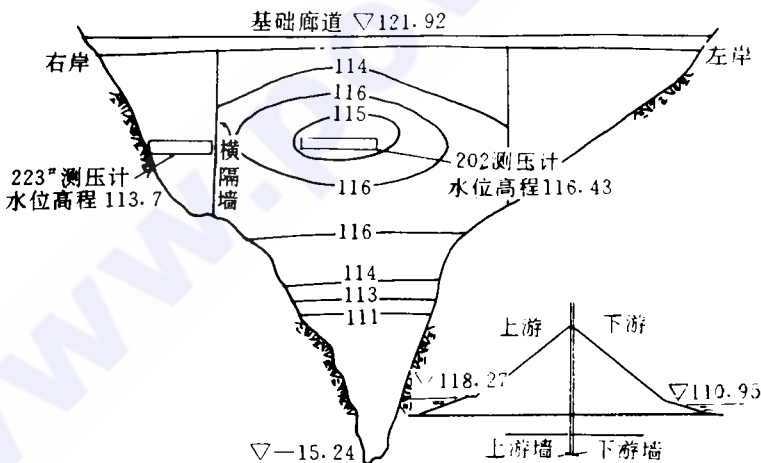


图15 下游墙上游面水压力分布图

注：测压计水位高程以米计，测压计等压线。

另外,在基础廊道内埋设了测压盒、液压压力盒和弦式测压计,埋设的全部仪器都可在廊道内通过接线盒测读,也可以在廊道尽头的控制室内由自控系统自动检测、记录,还可传到蒙特利尔市(Montreal)魁北克水电检测中心进行检测成果分析。

3.2 观测成果分析

3.2.1 防渗墙墙面水压力观测 由1973年12月观测记录可见,位于上游混凝土防渗墙的上游面水压力和其水深成正比。上游墙的上游侧和下游墙的下游侧压力分布极其相似,而上、下游墙间的水压力情况十分复杂如图15所示。在高程38.1m以上有一高水压区,而在该高程以下,两墙上的水压力基本相同,由于高水压区水压力相对较大,从而使墙体上半部较下半部透水量也相对大一些。但是靠近河床中部的下游防渗墙墙底,由于有架空的弧石和未清除的破碎和松动岩石,使其墙底渗透水量仍很大。从透水量记录来看,上、下游防渗墙的透水情况不一致。通过防渗效果分析,当用防渗墙而减少的渗透水量和同水头下无防渗墙时估计渗透流量之比和通过防渗墙体的水头损失与全水头之比进行估算,其防渗效率前者达96%,后者为85%。

3.2.2 防渗墙体变形观测 1973和1974年初,对该防渗墙体进行了变形观测如图16,是沿防渗墙轴线观测所得的沉陷量过程变化。当心墙填筑到工作平台高程以前,沉陷发展极缓慢。直到1972年冬季后继续浇注混凝土时,沉陷发展速度加快。在桩柱内埋设的仪器观测表明:各桩柱的平均应变值几乎是相等的,变化在0.088~0.011之间。按沉陷率0.01%计算,并假定防渗墙的弹模 $E=31\ 360\text{MPa}$,换算而得墙体的平均应力为3.2MPa。图16为不同桩柱观测所得沉陷变化过程线。

从观测记录可见,当工作平台以上只有

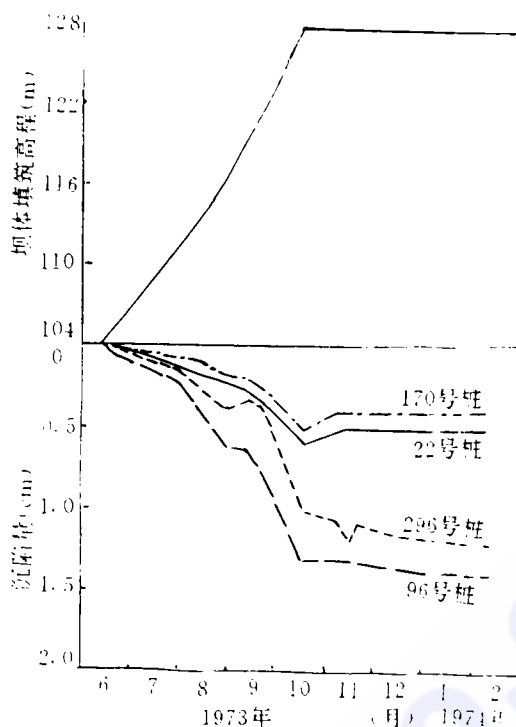


图16 马尼克-3防渗墙沉陷量过程线

12m 填土时,由于沉陷引起的墙面摩擦力值已使墙体达到极高的应力值。当坝体升高到工作平台以上95m时,防渗墙的底部应力便超过了混凝土的允许应力。实际上,当坝体沉陷趋于稳定后,填土与防渗墙墙面摩擦力并不大,加之防渗墙是在覆盖层的侧限下受压,即使墙体产生较大应力也不致开裂,也不会影响防渗效果,当防渗墙承受上游水压推力而产生变形,由于墙后覆盖层的侧压力平衡作用,墙体变形也不致过大。万一有裂缝发生,由于墙面泥皮阻隔,对防渗墙的防渗作用也不致明显削弱。

总之,马尼克-3主坝混凝土防渗墙无论就施工速度和施工质量而言,其质量是好的,施工速度是较快的,运行也是正常的。该工程负责人讲,如果该工程在90年代施工,工期至少可以缩短半年,费用可以节省1/3。施工质量将更无懈可击。从访问、考察所得印象,对这番话笔者深信无疑。(待续)

(收稿日期:19931008)