小浪底左岸河床段主坝槽孔混凝土防渗墙的施工与质量控制

吴中伟　　余飞涛　　廖忠刚
(黄委会设计院，郑州，450003) (黄委会水科院，郑州，450003) (黄委会设计院，郑州，450003)

提　要　黄河小浪底水利枢纽工程是一个建设与管理全面与国际惯例接轨的大型工程。施工中使用了许多先进的施工机械和工艺。本文对小浪底左岸河床段主坝槽孔砼防渗墙的施工机械、施工工艺以及工程师实施质量控制所采取的方法和手段进行了介绍。其先进的施工技术和工艺值得我们学习和借鉴。同时说明在工程建设中引进先进技术和实施建设监理的重要性。

一　概　述

小浪底水利枢纽工程拦河主坝为壤土斜心墙堆石坝，最大坝高 154m，坝顶长 1667m。防渗设计采用垂直防渗为主水平防渗为辅的双重防渗体系。砼防渗墙为地下防渗主要建筑物，轴线全长 465.7m，墙厚 1.2m，设计砼强度 R_{28}=35MPa。工程分二期施工，一期在右岸滩地；二期在左岸河床段，防渗墙轴线长 151m，最大造孔深度 70.3m。是大坝标最重要的施工项目。二期槽孔砼防渗墙所处地段底部为粉砂岩，顶部为 10～70m 的砂卵石层，粒径大于 20mm 的占 30%，小于 2mm 的占 50%，有少量直径 1～3m 的孤石；粉砂岩呈层状分布，裂隙非常发育，抗压强度约为 60～80kN/m^2。另外，该地段地层复杂，基岩形状多变，是目前国内施工规模最大，强度最高，施工难度最大的防渗墙工程。因此，施工中采用国际上先进的机械设备和与国内完全不同的施工工艺，以及新颖独特的槽孔接头形式；同时，实行了严格的质量控制。实施结果表明,施工质量满足技术规范要求，施工进度比计划提前了 57 天，为大坝及早填筑保证 1999 年安全度汛赢得了宝贵的时间。

二　主要施工机械

1. 液压洗槽机

液压洗槽机俗称“双轮铣”，为法国索列丹斯公司制造，是目前世界上先进高效的地下连续墙开挖设备。由履带式起重机和切削机体组成。起重机可自行定位提供电力、液压等动力，有三套起吊系统，分别负责切削机体、液压管路、泥浆管路的同步提升。切削机体由导向机架、泵体机架和切削机架三部分组成。其基本性能参数见表 1。

液压双轮铣标准开挖深度为 60m，最大可达 150m。整个销切头长约 1.5m，重量 25t，由一台 450 马力的履带式起重机支撑操作。切削机座固定在泵体机架下部。装有两组共 4

表 1　设备性能参数表

设备名称	型号	重量	发动机功率	切削扭矩
液压洗槽机	HF4000	25t	450 马力	4000mkg
履带式起重机	HS882	起重能力 120t	475HP	

个由液压马达驱动的鼓轮，鼓轮外装有超硬合金牙刀。工作时在自重压力下，液压马达带动鼓轮转动，利用牙刀切削地层，并将岩渣与浆液混合，由潜水抽浆泵（排量 300m³/h，最大渣径 100mm）将废浆和岩渣抽到地面，经过震动除砂机除砂后浆液重复使用。此设备一次成孔尺寸 2.8×1.2m。在切削头底部，有四个导向千斤顶，可支撑到槽壁上，以纠正偏斜。在切削头上还装有高灵敏度的测斜仪，经导线传送到微机上，据此进行不间断的控制，随时保证槽孔的垂直度。对轴线方向的纠偏，则利用两个切削轮的不同扭矩来校正。液压双轮铣与冲击钻的孔斜控制对比见表 2。

表 2　双轮铣与冲击钻孔斜控制对比表

孔深	平均孔斜（cm）		平均孔斜率（‰）	
（m）	液压双轮铣	冲击钻	液压双轮铣	冲击钻
20	2	20	1	10
30	1		0.3	
40		36		9
50		51		10.2
59	5		0.8	
60		68		11.3
68	5		0.7	

技术规范要求槽孔开挖面跟垂直线的偏差每 30m 不大于 0.075m，即小于等于 2.5‰的要求。由表 2 可见双轮铣的孔斜控制比冲击钻提高近 10 倍。

双轮铣的开挖工效与岩石硬度、裂隙发育程度和其他施工条件有关，见表 3。

表 3　双轮铣开挖平均工效表

岩石强度	干密度	平均进尺	开挖方量
(MN/m²)	(kN/m³)	(m/h)	(m³/h)
50	20	0.65	1.5
100	25	0.018	0.4
砂卵石	20	1.21	4.06

2. 钢缆式抓斗

钢缆式抓斗承担河床砂卵石覆盖层的开挖，是槽孔建造的主要设备，它有钳式与蛤式两种，自重分别为 11.7t 及 10t。在自行履带式吊车操控下对河床覆盖层直接抓挖成槽。重锤为抓斗的辅助设备，用于击碎孤石和岩石，以利抓斗抓挖。施工中使用的重锤有三种，即 TB、TE、TD，直径均为 1.2m。TB 底部为子弹头型，主要用于破碎孤石；TE 底部为

米字型，用于基岩开挖；TD 为矩形，用于修整孔型、纠偏等工作。重锤自重 9.7～12t。

3. 振动除砂机

振动除砂机有两套：生产率 100m³/h 的除砂机主要用于储浆池内对泥浆进行循环除砂，保证泥浆中含砂量小于 3%；生产率 450m³/h 的大型除砂机为双轮铣的配套设备，主要用于槽孔内抽回的泥浆作清渣除砂，使泥浆的含砂量降至合格要求，并循环使用。

三 施工工艺

1. 槽孔开挖

槽孔开挖时一台双轮铣和钢缆式抓斗配合使用。首先用抓斗进行覆盖层的开挖，并不断向孔内补充膨胀土浆液护壁。遇到大孤石时，改用重锤砸碎，用抓斗抓出。当开挖到基岩且使用重锤砸碎不理想时，改用双轮铣对岩石进行铣削，直至达到规范要求深入基岩的深度。表 4 为双轮铣开挖工效统计表。

表 4 小浪底工程液压双轮铣开挖工效统计表

开挖部位	进尺（m）	耗时（h）	平均进尺（m/h）	平均开挖量（m³/h）
主槽孔	2413.35	4454.85	0.54	1.37

2. 纠偏和测斜

槽孔开挖过程中，利用双轮铣自身的测斜装置，实时自动记录槽孔偏斜情况，通过计算机屏幕显示，对出现的偏差随时进行调整。开挖结束后，按照规范要求进行最终垂直度测定。沿槽壁下入双轮铣，利用双轮铣自身的测斜仪自动测出槽孔前后、左右的偏移值并计算出垂直度。双轮铣自身的纠偏装置不但加快槽孔开挖速度、保证槽孔质量，而且大大提高了工时利用率。

3. 基岩面的鉴定

基岩面形态复杂，正确判断基岩面高程，是保证防渗墙基础质量的关键环节。

判断方法和步骤：开挖到基岩后，用重锤硬砸，抓出破碎岩快，目测岩样的岩性和新鲜程度，如与地质钻孔资料相符，则判断此高程为初始基岩面；双轮铣铣削基岩的同时，在震动除砂机上抽取岩样，根据岩性和岩石含量，并对照钻孔资料来判断最终基岩面高程，一般新鲜岩石含量达 90%以上即可判定为正式的基岩面。

4. 泥浆固壁及清换

技术规范规定在开挖完成后，对槽孔内浆液进行更换，清除底部砂石，要求砂的含量不能超过泥浆质量的 3%，浆液循环 60min 后，沉淀不超过 15cm；并要求循环后的浆液比重不大于 1.1，马氏粘度不大于 90s，PH 值 9.5～12。

槽孔浇筑前半小时，将双轮铣放到槽底，利用底部大流量离心泵，把孔底的沙砾石和混有大量细砂的浆液抽送到不远的振动除砂机上进行处理，并不断向槽内补充新鲜浆液，20～30min 后，检查各项指标，满足要求后进行下道工序的施工。

5. 墙体浇筑

采用水下直升导管法进行混凝土浇筑。一般同时下入三根导管，分别置于槽孔两端和中央。槽孔底部最下层混凝土浇筑顺序是先浇深的，齐平后再同时浇筑。经统计砼面在槽孔内上升速度最快为 5.88m/h，最慢为 2.55m/h，平均达 4m/h。

四　质量控制

工程师对防渗墙的质量控制主要采取预控和过程控制。预控作为一种主动控制，表现为根据设计方案、工程地质条件、施工机械设备情况以及原材料供应、人员素质等对施工质量可能造成影响的多种因素进行认真分析，预先制定各种防范措施；过程控制作为主要控制，表现为具体施工过程中对各施工工序的监督与控制。预控与过程控制相结合，加之可靠的组织体系作保证，是防渗墙施工质量得以保证的成功经验。

1. 质量保证体系

工程师代表对整个施工质量负责；现场建立由工程师代表直接负责的责任工程师负责制，质量控制部主任和高级工程师轮流领班；槽孔开挖和浇筑砼过程中，责任工程师领导的工程师全天 24 小时轮流旁站监督。施工偏差与砼质量检测则分别由总监理工程师下属的测量计量部和试验室的工程师负责。

按工程师要求，承包商进行质量自检，按时量测各项施工参数，及时提交各工序施工报表和记录表格，密切配合工程师的现场质控工作。

2. 质量控制过程

在建立上述质量保证体系的基础上，工程师对各道重点施工工序进行严格的质量控制。图 1 为工程师的质量控制框图。即预控与过程控制的操作过程。

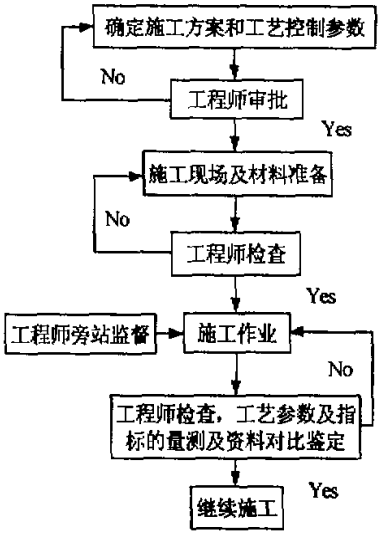


图1　防渗墙施工质量控制过程示意图

(1)施工方案

施工方案和施工详图审查是实行质量预控的重要步骤。防渗墙施工之前，承包商提出了第一份施工方案。该方案突出的问题是承包商提出因地质条件的变化，增大了施工难度，要求延长工期或索赔数千万元人民币。工程师认真研究了该方案在技术上的可行性和经济上的合理性。并从两个方面进行工作，一方面要求承包商在槽孔墙的左端头和“悬石”处，进行补充勘探，摸清这些部位基岩面的实际变化形状，提出修正方案；另一方面，对承包商提出的抓斗和双轮铣施工方案进行调研、对比和计算。经研讨、商谈取得了共识，同时征得设计认可、业主同意，批准了最终施工方案。

在比较防渗墙槽孔接头方案时，承包商先后提出了两种如图 2、图 3 的槽孔接头施工

方法。经过工程师审查后发现：第一种方法的Ⅰ、Ⅱ序槽之间要搭接 1.2m，进行Ⅱ序槽施工时还要把已合格的 1.2m 砼墙重新挖除，形成了不可避免的平齐接缝，不但挖除工作量大，而且平齐接缝存在着渗漏的隐患；第二种方法是先施工横向接头槽孔，浇注塑性砼，

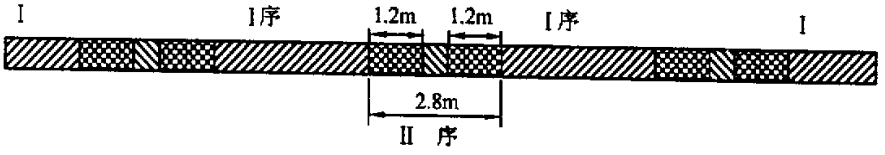


图2 接头第一种施工方法

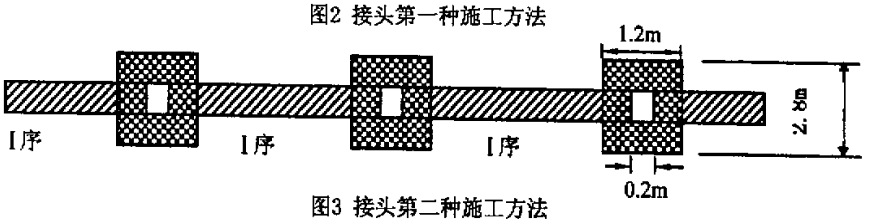


图3 接头第二种施工方法

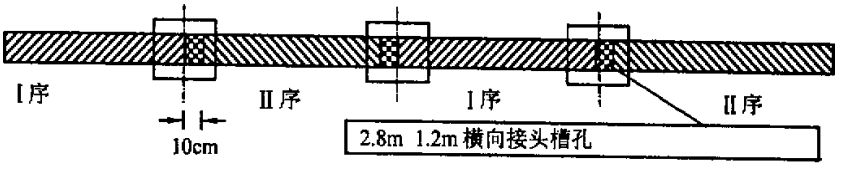


图4 实际采用的接头施工方法

然后再进行Ⅰ序槽孔的施工，实施结果是没有Ⅱ序槽孔，接头处留有 0.2m 的低标号塑性砼使得主墙体不连续，对于小浪底这样的高坝来说显然是不安全的。后经认真分析、比较、论证后，工程师在第二方案的基础上提出了如图 4 所示的接头方案。这个方案的要点是采用双轮铣底部鼓轮上的超硬合金牙刀，在施工Ⅰ序槽孔时跨越横向槽孔中心线多切削 10cm 厚的塑性砼，虽然与Ⅱ序槽孔仍为平齐接头，但上、下游有 0.8m 厚的结合紧密的塑性砼包裹保护，防渗性能可靠。经施工证明，该方案不但能发挥先进设备的优势，而且提高了施工效率。其新颖独特的接头方式在国际上尚属首次，是小浪底工程的一个创新。

(2)现场施工控制

依据施工过程控制图，施工中工程师始终以工序质量控制为核心，同时注重协调各方关系和信息资源的利用与管理。施工过程的质量控制主要体现在以下几个方面。

重视组织协调，理顺各方关系：施工初期，承包商与分包商内部不协调，现场负责人和技术人员不到位，施工组织混乱，联系渠道不畅。针对这种情况，工程师及时通报承包商，限其立即改正，建立有监理工程师、承包商和分包商的现场负责人参加的日协调会制度，责任工程师负责制等相关制度与措施，逐步理顺了关系。

严格工序质量控制，明确质量控制点：在每一个槽孔开挖前，根据已有的钻孔资料，绘制槽孔所在位置基岩面的预估深度形态图，以便鉴定基岩面时参考。将基岩面鉴定和砼浇筑列为主要控制点。

实行全方位、全天候现场旁站监理：监理人员对每道施工工序的各个环节实行有效的

监督与控制，随时抽查泥浆各项指标，对抓斗入槽、岩样鉴定、终孔深度和垂直度测量、换浆，特别是在砼浇筑过程中，对钢筋笼的就位和固定、导管的组装入槽、起拔管、砼塌落度的测量等进行全方位的监控，及时批准分包商提交的砼浇筑计划。

3. 质量检验

技术规范要求在砼防渗墙施工完成后钻孔取芯，作压水试验，以判断防渗墙的连续性。按照在施工中出现的异常部位、槽孔间接缝部位、浇筑正常部位的原则共布置 13 个钻孔。结果所有检查孔砼芯获得率均在 97%以上，最长的一段达 2.9m。施工异常部位钻孔结果表明岩心获得率达 99%，骨料分布均匀，未发现加泥现象。正常随机布置的钻孔结果表明岩心最小获得率为 97%，其余为 100%，砼骨料分布均匀，气孔较少，未见夹砂现象，墙体底部与基岩结合较好，压水试验结果表明透水率最大值为 1.97Lu，最小为 0Lu，透水性较小。接缝部位的检查孔表明槽孔间砼结合紧密，虽有很薄的泥膜，但压水试验表明透水率最大为 2.42Lu，最小为 0Lu，说明在墙体上采用全新的接头形式质量是完全有保证的。

五 结 语

1.使用机械式抓斗(辅以重锤)与双轮铣组合在小浪底大坝深覆盖层中造孔建造垂直槽孔砼防渗墙，它的先进性反映在采用了精良先进的施工机械和技术：快速高效的开挖方式，先进的测斜、纠偏、清洗、换浆施工工艺等。深覆盖层槽孔砼防渗墙的成功建造，为我国日后类似工程的建设提供了宝贵的实践经验。

2.采用横向槽孔浇筑塑性砼包裹保护的板式接头形式是非常新颖独特的墙体接头技术，保证了砼墙体的连续性使其防渗性能更可靠，这是小浪底砼防渗墙接头施工技术的一项重大创新，在国内属首次并处于领先水平。

3.施工中采用了优质的膨润土和一级配的高标号砼，所采用的材料合适，施工技术切实可行，其施工经验值得借鉴。

4.注重施工方案的研究和严格审查，做到预先控制；施工中建立了完整的质量控制保证体系；以工序质量控制为核心，明确质量控制点；对全过程的施工实行现场旁站监理，所有这些都是砼防渗墙质量得以保证的关键环节。

参考文献

[1] 杨鑫，吴喜：《小浪底砼防渗墙采用施工新工艺》，见《西北水电》，1998(4)。

[2] 水利部小浪底水利枢纽管理局编：《黄河小浪底建设工程技术论文集》，中国水利水电出版社，1997.10。

致谢：本文得到了王碧高级工程师的热心指导和帮助，在此表示衷心的感谢。