

高海拔高寒峡谷巨孤漂石地层混凝土防渗墙施工技术

李东福

Dong-fu li

(中国水利水电第七工程局有限公司 四川 成都 611130)

China Water Resources and Hydropower Seventh Engineering Bureau Co., Ltd.

Chengdu, Sichuan 611130

【摘要】西藏水能资源技术可开发量为 1.74 亿千瓦，位居全国第一，但青藏高原独特的地形地貌和复杂多样的地质特征，特别是该区域多为深 V 峡谷河段，崩坡冲积巨孤漂石地层，存在大起伏、河床深切陡坡，河床内巨孤漂石粒径大且含量超多，增加了西藏大古水电站工程防渗墙的施工难度。针对该类地质条件，通过采取超前同轴钻孔精准预爆技术、结合对巨孤漂石预爆、物探检测和三维地质可视化等基覆界线判定综合集成技术，安全、高效、保质保量完成防渗墙施工。该技术不仅先进、成熟可靠，可有效规范高海拔高寒峡谷巨孤漂石地层地区混凝土防渗墙施工工艺和实现标准化、程序化作业，便于施工人员操作执行，而且经济效益和社会效益突出。

【关键词】 高海拔 高寒 峡谷 西藏大古 水电站 巨孤漂石 防渗墙 施工技术
中图分类号：TV122 文献标志码：A 文章编号：

【abstract】 The exploitable capacity of hydropower resources in Tibet is 174 million kilowatts, Ranking first in the country, However the Tibetan Plateau has unique topographical features and complex and diverse geological features, In particular, this area is mostly the deep V canyon section, Colluvial alluvial giant boulder formation, There are deep steep slopes of highly undulating riverbed, The granule size in the riverbed is large and the content is too much, It increases the difficulty in construction of seepage wall of Dagu Hydropower station in Xizang province. For this type of geological conditions, By adopting advanced coaxial drilling precise pre-detonation technology、Combined with the pre-detonation of the giant boulder、Geophysical detection and 3 d geological visualization and other base boundary determination integrated technology, Complete the construction of cut-off wall with safety, efficiency, quality and quantity. The technology is not only advanced, mature and reliable, It can effectively standardize the construction technology of concrete cutoff wall and realize the standardized and programmed operation in the high altitude and cold valley area of Giant gu bleach stratum, which is convenient for the construction personnel to operate and carry out, and has outstanding economic and social benefits.

【 Key words 】High altitude, Cold, Ravine, Dagu Hydropower Station in Xizang Province, The isolated boulders, Cutoff wall, The construction technology

Chinese library classification number: TV122 Document mark code: A

Article number:

1 引言

西藏水能资源技术可开发量为1.74亿千瓦，位居全国第一，但青藏高原独特的地形地貌和复杂多样的地质特征，增加了水电工程的施工难度，特别是该区域多为高海拔高寒深V峡谷河段，崩坡冲积巨孤漂石地层，存在大起伏、河床深切陡坡^[4]，河床内巨孤漂石粒径大且含量超多。目前在西藏地区施工的水电工程都面临基岩覆盖层界线判定困难，混凝土防渗墙施工造孔时易将原始河床覆盖层中的巨孤漂石判定为基岩，导致混凝土防渗墙未真正伸入基岩而悬挂的问题，造成基坑抽排水时，水压力击穿混凝土防渗墙下部原始覆盖层而发生透水事故。防渗墙施工存在基覆界线判定难、花岗岩性巨孤块漂石地层处理难度大、孔斜控制难度大等技术难题。

高海拔高寒峡谷巨孤漂石地层混凝土防渗墙施工技术，通过采取超前同轴钻孔精准预爆技术、结合对巨孤漂石预爆、物探检测（电磁波CT、钻孔录像及单孔声波）和三维地质可视化等基覆界线判定综合集成技术，以及调整混凝土原材料、改进施工设备等措施。安全、高效、保质保量使大古水电站围堰防渗墙分别提前完成。该技术不仅先进、成熟可靠，可有效规范高海拔高寒峡谷巨孤漂石地层地区混凝土防渗墙施工工艺和实现标准化、程序化作业，便于施工人员操作执行，取得了很好的效果，对类似地质条件下防渗墙成槽施工具有重要的参考价值。

2 工程概况及工程地质条件

2.1 工程概况

西藏大古水电站拥有世界海拔最高，雅江坝高的RCC大坝，是目前西藏装机最大的水电站。大古水电站装机容量为660MW，为二等大（2）型工程。施工导流为一次全断面挡水围堰河床截流，导流洞泄流。上下游围堰为土石围堰，围堰基础防渗采用1.0m厚混凝土防渗墙下接帷幕灌浆作为防渗体系，防渗墙嵌入基岩1.0m。

2.2 工程地质条件

上下游围堰防渗墙基岩岩性为黑云母花岗闪长岩，呈弱风化状，岩体较完整~完整性差。围堰河床部位总体呈V型，主要为冲积漂卵石，漂石含量35%~40%，直径以0.5~2.0m为主，大者直径可达7m，中细砂充填其间，局部存在架空现象；巨孤漂石，岩性均一，无软弱层及分层性，岩性细密坚硬，具有很高的强度，经测试，其强度一般为180MPa-240 MPa。

3 技术原理

针对高海拔高寒峡谷陡倾角边坡、倒悬地形、覆盖层内巨孤漂石含量高等复杂地质条下的围堰混凝土防渗施工^[4]，首先采用液压履带钻机配高压空压机进行钻孔，利用套管跟管方式钻进覆盖层成孔，下设PVC管方式，通过钻孔渣样及钻进速度初步判定覆盖层中巨孤漂石粒径大小和位置，同时结合物探检测（电磁波CT、钻孔录像及单孔声波）和三维地质可视化等集成技术^[6]，实现对巨漂孤石和基覆分界线的精准判定。然后采用连续不耦合方式装药后利用电力导爆管联合启爆法”进行爆破作业，实现将防渗墙轴线范围内的巨孤漂石破碎，解决成槽困难、孔斜控制难度大的难题。再采用冲击钻成槽，在松散透水地基或坝（堰）体中以泥浆固壁，在槽（孔）内浇筑混凝土或回填其他防渗材料筑成的具有防渗等功能的地下连续墙。并利用声波CT法对混凝土防渗墙质量进行检测。同时对墙下帷幕灌浆后进行灌后声波CT检测，在评定灌浆质量的同时，再次检验基覆界线进行复核判定。

4 施工工艺流程及操作要点

4.1 工艺流程

高海拔高寒峡谷巨孤漂石地层混凝土防渗墙施工技术工艺流程：场地平整（泥浆系统建设）→孤漂石预爆→施工平台及导墙→轨道铺设及安装造孔设备→单孔施工（基覆界线判定综合集成技术）→槽段验收→下设接头管及灌浆埋管→混凝土浇筑成墙→接头孔施工→完工清场（效果检查）。

4.2 操作要点

4.2.1 场地平整及泥浆系统建设

在正式施工前，采用挖掘机或装载机，配合振动碾压机对防渗墙施工区域进行整平、压实。同时在合适位置修建泥浆池、储浆池、废浆池等形成泥浆系统，满足槽孔建造固壁泥浆的使用及回收。

4.2.2 巨孤漂石预爆

（1）采用 A66 阿特拉斯全液压履带式钻机配高风压阿特拉斯 XHS485 空压机进行钻孔，用 $\Phi 152\text{mm}$ 带扩孔套同心钻头配 $\Phi 146\text{mm}$ 套管跟管方式钻进覆盖层成孔，基岩采用 $\Phi 110\text{mm}$ 钻头裸钻成孔^[1]。钻孔出渣方式为高风压孔内反循环出渣，钻孔深度、垂直度须满足设计要求的嵌入深度。

（2）在施工过程中，通过钻孔渣样及钻进速度初步判定覆盖层中巨孤漂石粒径大小和位置。

（3）预探预爆孔钻孔完成后，首先利用高压风对钻孔内的沉渣进行冲洗，冲洗完成后将 $\Phi 110\text{mm}$ PVC 管逐节下设至孔内，PVC 管节与节之间的连接采用透明胶带粘结，粘接的胶带上下宽度不超过 20cm，粘结厚度均匀避免套管起拔时将 PVC 管带出，造成钻孔塌孔。PVC 管下设完毕后先采用液压拔管机将套管拔出。

（4）在炸药进入现场前应确定一处炸药保管及药串制作场地，场地布置警示标志，警戒线并安排专人进行值班管理。炸药领取提前 24 小时向炸药管理部门提出使用计划，经批准并完善领取手续后，由专人到库房进行领取、登记，专人负责、专车运送至现场^[1]。

（5）“药串”制作采用“绑扎法”施工工艺。“绑扎法”主要是根据爆破设计图在药串制作场地首先用钢卷尺（50m）放出相应爆破孔孔深长度；然后铺设麻绳、 $\Phi 10\text{PVC}$ 管（采用液体强力胶及接头接长）、导爆索，麻绳及导爆索应比爆破孔深长 0.5~1.0m；最后根据爆破设计图，将炸药与麻绳、 $\Phi 10\text{PVC}$ 管、导爆索采用电工胶带绑扎在一起。在“药串”制作过程中，制作人员不得携带打火机、手机、对讲机等进入警戒区^[1]。

（6）“药串”加工制作完成后，采用人工运输至孔口，沿孔内 $\Phi 110\text{PVC}$ 管缓缓下入，若遇孔内卡顿，不得猛拉猛提，应缓缓活动“药串”慢慢下设至孔底，若因孔内掉块等原因无法将炸药下设至指定位置影响预爆效果的，应采取扫孔措施，待下一批次进行爆破作业；“药串”下设

至指定位置后，将药串顶部预留的麻绳采用木条绑扎后固定在孔口^[1]。

(7) 炮眼封堵采用“灌砂法”。“药串”下设完成后，采用细砂从孔口四周灌入爆破孔内，将砂灌满至孔口，然后用水浸润使砂能够逐渐沉淀密实，如此进行多次直到孔口加入的细砂能够完全填满预爆孔与“药串”的空隙部位。

(8) 预爆孔炸药连线采用“串联”方式，起爆采用“电力导爆管联合启爆法”^[1]。爆破完成后，派专人对盲炮、哑炮等进行检查，确认安全后方可解除警戒。

(9) 预爆孔爆破完成后，按照有关要求做到工完场清。

4.2.3 基覆界线判定

由于在预探预爆施工中进行了钻孔施工，收集的渣样由设计地质专业工程师、监理地质专业工程师、建设单位地质专业工程师通过常规的方法进行现场查看、鉴定，通过渣样和钻进速度初步判断了巨孤漂石粒径大小及位置和防渗墙基覆界线。为确保数据的准确性，在预爆、防渗墙造孔前，选用电磁波 CT 法对巨孤漂石防渗墙基覆界面进行鉴定。

电磁波 CT 法：深 V 峡谷河段存在基岩陡倾角边坡、倒悬地形，两检测孔间距不超过 15m，在坡度较大的位置可调整为 10m；为避免将覆盖层内巨孤漂石误判为基岩，钻孔深度比孤漂石预爆、地质勘探等初探深度再向下延伸 15m；同一工程位置，不同剖面选用相同频率及相同观测方法，以避免系统误差的累计；CT 扫描采用水平同步、斜同步、定点发射和定点接收的扇形束观测三种方式，检测过程中严格校对好孔口高程及孔底深度，在测试过程中每 5m 校对一次深度。

采用电磁波 CT 扫描的方式，将地质情况探测由“点”式扩展为“面”式，大大提高基础与覆盖层分界判断的准确性。经过声波 CT 对地层的检测，根据测量所得的波速值，按照 1m 间距，通过分析计算出基础与覆盖层的分界线。

4.2.4 导向槽施工

导向槽设计为倒直角梯形形式，作为围堰盖帽基础不拆除。导墙基础碾压密实后，再布筋立模浇筑导墙，导墙修建必须满足下列技术要求：

(1) 导墙应平行于防渗墙中心线，其允许偏差为 $\pm 1.5\text{cm}$ ^[3]。

(2) 导墙顶面高程（整体）允许偏差为 $\pm 2\text{cm}$ ^[3]。

(3) 导墙顶面高程（单幅）允许偏差为 $\pm 0.5\text{cm}$ ^[3]。

(4) 导墙间净距允许偏差为 $\pm 0.5\text{cm}$ ^[3]。

(5) 导墙内墙垂直度允许偏差为 $\leq 0.2\%$ 。

(6) 导向槽混凝土浇筑时，沿轴线每间隔 20~50m 设置一个混凝土错台作为施工分缝；

(7) 为保证导向槽的整体性，沿轴线每间隔 10m（一般为二期槽 3 号孔）布设一道高 1.2m，宽 1.1m，厚 0.3m 的混凝土支撑墙。

(8) 导向槽每浇筑完成一段，则需及时对混凝土面采取保温措施。

4.2.5 造孔

临建设施完成后，由施工技术人员按照槽段划分图纸进行槽段划分，然后槽孔施工设备就位进行施工。槽段采用冲击钻成槽，钻孔过程中需经常测量孔斜，如果孔斜超出要求须及时进行纠偏。防渗墙典型槽段长度 7m^[3]，一二期槽孔均分为三主两副，钻孔设备主要选用 CZ-6D 型冲击钻机。采用槽孔孔斜控制辅助装置，做到了防渗墙成槽最大孔斜率的平均值不超过 0.19%，其控制指标超出设计标准。

4.2.6 清孔

清孔时如果单元槽段内各孔孔深不同，清孔次序为先浅后深。清孔采用“气举法”：成槽以后，先用抽筒对槽段进行初清即用抽筒将槽内较大颗粒的钻渣及槽底沉渣清理出槽，再用“气举法”吸取孔底沉渣，经泥浆净化机净化后的泥浆返回槽内，并用刷壁器清除槽段接头处的凝胶物。清槽后泥浆性能及淤积等指标满足规范、设计要求^[3]。清孔换浆完成后及时下放预埋灌浆管，并在清孔验收合格 4h 内开始浇筑混凝土^[3]。

二期槽孔清孔换浆结束前，应分段刷洗槽段接头混凝土孔壁的泥皮，以达到刷子钻头上不再带有泥屑及槽底淤积层厚不再增加为准。

4.2.7 灌浆预埋管施工

(1) 预埋管的布置

根据预埋灌浆管的间距、槽孔长度与深度、防渗墙浇筑导管的布设要求来确定防渗墙中需要埋设灌浆管的根数和位置^[2]。一般加工制作成可埋设 3 孔灌浆管的整体支架，特殊槽段或特殊部位则根据实际槽孔单独制作。确保相邻的灌浆管间距为 200cm，并随时注意调整一期槽孔与二期槽孔端头部位相邻两灌浆管的间距为 200cm。

(2) 预埋灌浆管桁架的制作

根据设计要求预埋管选用 $\Phi 110\text{mm}$ 钢管连接而成，单根钢管考虑长度为 12m，预埋管最大下设深度为 51m。桁架用 $\Phi 25\text{mm}$ 钢筋焊接制作，下设过程中第一个桁架距孔底 3m 控制，其他每隔 12m 下设一个，以起到对预埋管的定位和控制孔斜的作用。

(3) 预埋管下设

当槽孔清孔验收合格后，采用 25t 吊车在槽孔现场起吊下设。初步对中后校正上、下两根预埋钢管的垂直度，偏斜率符合要求后，桁架与预埋管用电焊点焊方式固定，基本固定后再分组连接上、下灌浆预埋管，下设以此循环。预埋管连接采用丝扣形式进行上下连接，为了防止下设过程中管件脱落，每根预埋管外侧设置 3 道连接加强钢筋。下设结束后对管口进行保护，防止混凝

土进入管内。

(4) 预埋灌浆管施工质量控制与检测

1) 预埋灌浆管应有足够的强度和刚度，管接头应牢固，下设前应先在地面上组装，检查其是否顺直，其弯曲度应小于 0.6%。

2) 埋设过程中要注意保持预埋管垂直度，特别是上、下两根预埋管连接应保持对正。

3) 在防渗墙混凝土浇筑过程中，严格控制浇筑速度，如果浇筑管混凝土速度上升过快且上升不均匀，极易导致浇筑管倾斜和定位架造成刮卡，引起埋管事故，因此应保证混凝土均匀上升，且及时提升浇筑管。

4) 应保护好预埋管，防止异物坠入。

4.2.8 墙段连接施工

(1) 防渗墙墙段连接采用“接头管法”施工，一期槽段清孔验收完成后，在一期槽两端孔处下设接头管。下设前确保接头管底阀开闭正常、底管内的淤积清除完毕、接头管的卡片否齐全、锁块活动自如等。接头管下设完成后需保证其在孔内的垂直度。

(2) 一期槽段开始浇筑时，通过对混凝土现场取样试验确定混凝土的初凝、终凝时间，从而确定接头管的起拔时间。

(3) 安排专职人员负责接头管起拔，随时掌握砼面深度和接头管的埋深情况、准确检测砼的初终凝时间，随时观察接头管的起拔力，避免发生铸管事故。

4.2.9 接头清理

在二期槽成槽施工完成后，预埋灌浆管下设前，对相应的接头孔采用专用装置进行清理。接头清理合格标准按有关要求执行，合格后进行下一工序施工。

4.2.10 槽混凝土浇筑

混凝土拌制由系统拌和楼统一拌制，采用 10m³ 混凝土罐车运输到各个浇筑面进行浇筑。

浇筑导管使用直径不小于 250mm 的导管。导管下设前，事先在地面进行导管组合，使每根不同位置的导管能够适应其所处位置的孔深情况。导管组合完毕后，认真作好记录，以便指导下设和拆除。

浇筑导管下设根据工程实际情况选用合适的设备，导管间距需满足设计、规范要求。

浇筑混凝土采用泥浆下“直升导管法”。开浇前使用橡皮球放入导管中隔离泥浆。在浇筑过程中，槽口有现场技术员观测，根据浇筑导管的混凝土埋深情况起拔和拆卸导管。混凝土浇筑要求连续、均匀上升，直至达到设计高程终止混凝土浇筑后拔出导管。

4.2.11 完工清场

防渗墙施工完成后，按照有关要求做到工完场清。工作面移交，进行下一工序施工。

5 实施效果

采用高海拔高寒峡谷巨孤漂石地层混凝土防渗墙施工技术，对巨孤漂石进行预处理，通过三维地质可视化建模、物探 CT、孔内摄像等基覆界线判定综合集成技术，实现了防渗墙优质、高效施工。质量检查成果见表 5.1。

表 5.1 质量检查成果表

序号	检查手段	检查成果	备注
1	基覆界线判定	通过综合集成技术，实现了基覆界线判定准确率达 100%。	
2	槽孔斜率控制	混凝土防渗墙成槽最大孔斜率的平均值不超过 0.19% ^[7] ，远小于类似地质条件规范要求的 0.6%（陡坡部位 0.8%）。	
3	混凝土试件	凝土取样 42 组，混凝土的抗压强度、抗渗、抗冻等性能指标均满足设计要求。	
4	钻孔取芯	1m 厚薄壁混凝土防渗墙芯样单根长 8.97m（直径 127mm）、取芯率 100%、芯样连续、表面光洁、密实度好。创国内同类工程新记录。	
5	墙体渗透系数	混凝土防渗墙最大渗透系数为 $9.22 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ ，最小渗透系数为 $4.57 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ ，注水结果满足设计（透水率 $\leq 10 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ ）标准。	
6	物探检测	第三方物探采用声波 CT 法对混凝土防渗墙质量进行检测。混凝土防渗墙体测区未见明显相对低速区，混凝土浇筑均匀连续；墙体同基岩接触段灌浆效果较好。	
7	基坑排水量	合同要求混凝土防渗墙应渗水量 $\leq 200 \text{m}^3/\text{h}$ 。超标洪水（持续 151 小时）条件下，围堰水头差达 62m，围堰渗水量 $< 100 \text{m}^3/\text{h}$ ，基坑实际抽排水总量 $< 300 \text{m}^3/\text{h}$ ^[7] 。	

6 结语

西藏大古水电站围堰防渗墙地层巨孤漂石含量高，强度高，防渗墙施工工期紧，工程量较大，巨孤漂石地层成槽难度大，施工质量难保证。在西藏大古水电站围堰防渗墙施工过程中研究应用的高海拔高寒峡谷巨孤漂石地层混凝土防渗墙施工技术，较好解决了防渗墙成槽的难题。其技术的特点是：

（1）常规的钻孔取芯判断地层的覆盖层与基岩的分界线在地层起伏不大的条件下十分实用，其主要是通过单点的取样，然后通过地质剖面连线以确定某一区域的基岩与覆盖层的分界线，但以上技术在常规地质条件下适用。对于像雅鲁藏布江深 V 峡谷河段花岗岩性巨孤漂石地层基覆界线判定难、处理难度大、孔斜控制难度大等技术难题。则采用巨孤漂石预爆、物探检测（电磁波 CT、钻孔录像及单孔声波）和三维地质可视化等基覆界线判定综合集成技术，实现对覆盖层中巨孤漂石的精准定位和基覆界线的准确判定，解决了传统单一方式易将巨孤漂石判定为基岩的弊端。

（2）针对巨孤漂石地层条件，采用超前同轴钻孔精准预爆技术与新型导向槽一体浇筑、槽孔孔斜控制辅助装置等，能高效的解决全孔多次爆破对地层扰动大、孔斜控制难度大、回填块石架空漏失地层漏浆塌孔的难题。

（3）针对高海拔峡谷高寒气候环境和防渗墙透水系数要求指标高的特点，通过调整混凝土抗压强度指标，增设抗渗、抗冻指标等参数（塑性混凝土调整为刚性混凝土）^[7]，可避免混凝土施工期冻裂而影响防渗质量^[7]。

（4）该技术研发的环状和条状钻具耐磨防护装置、高架回转式钻具修复装置^[5]，解决了花岗岩地层施工中钻具磨损严重、钻具修复频率高的难题。且以上装置的研发，加快了施工进度，降低了劳动强度，对高海拔高寒环境下作业工人的职业健康与劳动保护产生积极的效益，同时也解决了高原环境施工效率低的问题。

本技术适用于高海拔高寒峡谷巨孤漂石地层条件下水利水电工程的土石围堰、堆石坝等工程的混凝土防渗墙施工，对一般地区巨孤漂石地层条件下的混凝土防渗墙施工亦有借鉴作用。

参考文献：

[1] 李东福，超前钻孔精准预爆技术在防渗墙施工中的应用[J].水力发电，2019(12):59-61+67。

[2] 高钟璞.大坝基础防渗墙.北京：中国电力出版社，2000.1。

[3] 电力行业水电施工标准化技术委员会.水电水利工程混凝土防渗墙施工规范.北京：中国电力出版社，2005.1。

[4] 田彬等.巨漂孤石、倒悬体及陡坎地层中防渗墙施工关键技术探讨及应用[J].四川水力发电, 2019年S2期: 132-137。

[5] 张伯夷, 李东福, 杜原谅. 高寒高海拔地区巨孤漂石地层防渗墙成槽工艺研究及应用[J]. 施工技术, 2017, 46(S2): 342-344。

[6] 李东福, 朱荀. 浅谈声波 CT 在围堰防渗墙体系质量检测中的应用[J]. 科技视界, 2017(28): 127+152。

[7] 杨光忠. 藏区巨孤漂石地层土石围堰防渗体系监理控制[J]. 水利规划与设计, 2018(10): 174-178。

作者简介：

李东福（1983-），男，四川遂宁，高级工程师，从事水利水电施工管理工作。

联系电话：18280860033，邮箱：99707269@qq.com