

三峡三期土石围堰防渗墙施工工艺

顾志刚¹, 吴建平², 赵国瑞³

(1. 三峡电力职业学院, 湖北 宜昌 443000; 2. 浙江东方职业技术学院, 浙江 温州 325011;
3. 中国葛洲坝集团三峡指挥部, 湖北 宜昌 443002)

摘要 根据三峡三期土石围堰防渗体设计要求和施工特点, 选择了振孔高喷、常规钻孔高喷、钻喷一体化高喷和自凝灰浆等 4 种防渗墙施工工艺进行论证。在分析比较各种施工工艺特性的基础上, 对 4 种工艺进行了现场试验, 试验结果表明 4 种工艺均可用于三峡三期土石围堰防渗墙施工, 并确定上游围堰采用“自凝灰浆 + 常规钻孔高喷 + 钻喷一体化高喷”, 下游围堰采用“振孔高喷为主, 辅以常规钻孔高喷”的施工方案。在施工中, 各种施工工艺相互配合, 发挥了各自的优势, 确保了三峡三期土石围堰防渗墙工程按期、高质量地完成。

关键词 防渗墙 振孔高喷 常规钻孔高喷 钻喷一体化高喷 自凝灰浆 三峡水利枢纽工程

中图分类号 TV543+.8 **文献标识码** B **文章编号** 1006-7647(2007)04-0064-03

Impervious wall construction technology of stage III earth-rock cofferdam in Three Gorges Project//GU Zhi-gang¹, WU Jian-ping², ZHAO Guo-rui³ (1. Three Gorges Vocational College of Electric Power, Yichang 443000, China; 2. Zhejiang Dongfang College of Vocational Technology, Wenzhou 325011, China; 3. Headquarters of Three Gorges Project, China Gezhouba Group Company, Yichang 443002, China)

Abstract: According to the design requirement and construction characteristics of the impervious wall in Three Gorges Project, 4 kinds of construction technology were selected and discussed, including vibration hole and high-pressure jetting, conventional high-pressure jetting, integrative drilling and jetting, and self-setting mortar. Comparative analysis and field tests on the 4 kinds of technology showed that they were all suitable for impervious wall construction in stage III earth-rock cofferdam in Three Gorges Project. It is also concluded that the technology of self-setting mortar, conventional high-pressure jetting, and integrative drilling and jetting should be adopted in upstream cofferdam construction, and the technology of vibration hole and high-pressure jetting assisted with conventional high-pressure jetting should be used in downstream cofferdam construction. Moreover, different kinds construction technology should be cooperated with each other to ensure the completion of the impervious wall with high quality on schedule.

Key words: impervious wall; vibration hole and high-pressure jetting; conventional high-pressure jetting; integrative drilling and jetting; self-setting mortar; Three Gorges Project

1 工程概况

三峡水利枢纽工程采用“三期导流, 明渠通航”的施工导流方案。第三期导流时段为 2002 年底至 2009 年上半年。其主要施工项目: 首先在导流明渠内进行三期截流, 接着施工三期上、下游土石围堰, 再在其保护下浇筑三期碾压混凝土围堰, 然后在三期碾压混凝土围堰、三期下游土石围堰和混凝土纵向围堰围护下修建右岸厂房坝段、右岸电站厂房及右岸非溢流坝。

三期上游土石围堰为 IV 级临时建筑物, 围堰轴线呈直线布置, 防渗轴线全长 400.98 m。设计要求防渗体采用单排高压旋喷灌浆, 上接土工合成材料心墙,

下接水泥灌浆帷幕。高喷墙厚 0.8 m, 最大墙深 35.5 m。防渗轴线上、下游 5 m 范围内, 地层自上而下为回填风化砂层、全风化层、强风化层及弱风化层。

三期下游土石围堰为 III 级临时建筑物, 围堰轴线呈折线布置, 防渗轴线全长 426.35 m。设计要求防渗体采用双排高压旋喷灌浆, 上接土工合成材料心墙, 下接水泥灌浆帷幕。高喷墙厚 1.0 m, 最大墙深 28.0 m。防渗轴线上、下游 5 m 范围内, 地层自上而下为回填风化砂层、强风化层及弱风化层。

显然, 根据设计要求, 三峡三期上、下游土石围堰都以高压旋喷墙为防渗体的主要结构形式。其主要施工特点如下:

a. 上、下游土石围堰防渗墙施工总面积达

2.03 万 m²,而施工工期仅为 40 d 左右,工期紧,强度高,预计最大日施工强度达 1 000 m² 以上,其施工强度超过了 1995 年在王甫洲工程创造的 4 个月完成 3.25 万 m² 高喷墙施工的当时国内纪录。

b. 高压旋喷墙的造孔深度大,上游土石围堰的最大孔深达 35.5 m,且对造孔孔斜的精度要求高,要求孔底偏斜率小于 1%,施工难度大。

c. 高喷墙的施工紧随围堰填筑施工进行,回填风化砂层尚未完全沉降固结,存在沉陷、易塌孔、成孔困难等问题,同时右岸护坡、护底的混凝土厚度达 1~1.5 m,对高喷造孔有一定影响。

d. 高喷墙施工平台只能根据围堰施工情况逐步提供,由右向左推进,施工进度受到围堰填筑进程的制约。

e. 高喷防渗墙左、右接头部位,上游围堰高喷墙由单排增至 3 排,下游围堰高喷墙由双排增至 6 排,相应增大了工程量,且左接头段施工场地狭窄,提供部位的时间较迟,进一步导致施工强度增大。

鉴于三期上、下游土石围堰防渗墙施工存在强度高、难度大等问题,因此,优选施工工艺就成为工程成败的关键举措。为此,施工单位对以高喷灌浆为主的多种防渗墙施工工艺进行了调研、试验及方案论证工作,并在此基础上进行科学决策,选择了振孔高喷、常规钻孔高喷、钻喷一体化高喷及自凝灰浆等 4 种施工工艺,并成功地进行了应用,确保了三峡三期土石围堰按期、高质量地完成。

2 各种施工工艺的分析比较

2.1 振孔高喷工艺

振孔高喷工艺是目前国内较为先进的防渗墙施工工艺,也是三峡三期土石围堰工程招标文件中重点推荐的施工工艺。其工艺过程为:首先用大功率的振动锤将整根高喷管快速送至设计深度,然后边旋转喷射浆液,边提升高喷管到孔口,完成一个孔的灌浆施工后,再将设备移到相邻孔位,不分序地进行下一孔的高喷施工。

a. 主要优点。下管速度快,在三峡抛填花岗岩风化砂中,下管速度可达 2~10 m/min,且施工过程中不需接、卸喷管,可连续施工,不分序,不待凝,不怕塌孔,不担心串浆。既可保证墙体的连续性和完整性,又可提高总体施工效率。

b. 存在的主要问题。在基岩部位的送管速度慢,入岩深度不宜过大,成墙深度难以超过 25 m,且施工设备社会存有量较少。

c. 应用分析。适用于孔深小于 25 m 地段的防渗体快速施工。可考虑采用适量的振孔高喷设备,

配合其他工艺共同完成三期围堰防渗墙工程。

2.2 常规钻孔高喷工艺

常规钻孔高喷工艺是较为成熟的基础处理施工工艺,在国内外防渗工程中得到广泛应用。三峡三期土石围堰防渗墙工程拟采用的是常规新二管法高压旋喷灌浆工艺。其工艺过程为:先用岩芯钻机钻孔,成孔后在孔内下入高喷管,以大于 30 MPa 的高压进行高喷灌浆。为确保钻孔孔壁的稳定,常分 2~3 序进行施工。

a. 主要优点。工程实例多,技术成熟,高喷深度大,成墙质量好,设备的社会存有量大。

b. 存在的主要问题。在水下抛填风化砂中钻进易塌孔,高喷时易串浆,需分 2~3 序施工,综合效率低,工期长。

c. 应用分析。可与振孔高喷、钻喷一体化高喷等工艺配合,承担深度较大地段的高喷灌浆施工任务。

2.3 钻喷一体化高喷工艺

钻喷一体化高喷工艺是在常规钻孔高喷工艺的基础上,将钻机与高喷机合二为一,进行高喷施工的工艺。其工艺过程为:用钻喷机将钻杆(即高喷管)回转钻进至预定深度,然后边上提钻杆边进行高喷灌浆,需分序施工。

a. 主要优点。钻孔速度快,成孔深度较大,钻喷一体设备不移位,辅助作业时间少,成墙效率高,可克服塌孔串浆等故障。

b. 存在的主要问题。设备数量、型号均有限,国内的工程实例少,需研究有关设备和技术标准。

c. 应用分析。可与振孔高喷、常规钻孔高喷等工艺配合完成防渗墙施工任务。

2.4 自凝灰浆防渗墙施工工艺

自凝灰浆防渗墙施工工艺是我国在 20 世纪 80 年代引进的防渗墙施工新工艺^[1]。其工艺过程为:先用抓斗和旋挖钻机在风化砂中成槽,基岩部分则用挖凿、抓成槽(孔)在开挖过程中向槽中注入自凝灰浆,灰浆逐渐与地层中砂土混合凝结成墙。

a. 主要优点。施工速度快,造价较低,主要施工设备(抓斗)的社会存有量大,且成墙为柔性材料,能适应堰体变形,防渗效果好。

b. 存在的主要问题。国内工程实例少,施工经验较缺乏。

c. 应用分析。若嵌岩深度满足设计要求,则可在三期围堰防渗墙施工中应用。

3 现场试验及施工方案确定

3.1 现场试验

为了论证各种施工工艺及材料对三峡三期围堰

防渗墙工程的适用性,以及论证各种施工工艺能否满足高强度、高精度的施工要求,并取得最优施工参数,施工单位在防渗墙工程正式施工前,在模拟试验场地进行了以振孔高喷为主、常规钻孔高喷为辅、钻喷一体化高喷和自凝灰浆为技术储备的4种工艺现场试验。试验内容主要包括钻孔、喷浆、材料配比、机具性能、工艺流程、工效等。现场试验从2002年8月初开始,9月中旬结束,较全面地获得了各种工艺的施工参数。

振孔高喷工艺进行了单旋喷孔、连续墙施工旋喷孔等两种类型孔的高喷试验。通过挖桩检查,桩径最小为1.1 m,墙体连续性好,墙厚可达1.0 m,孔斜小于或等于1%。常规钻孔高喷工艺进行了单旋孔、套接孔和墙体埋灌浆管的试验。通过挖桩检查,桩径最小为1.2 m,搭接厚度大于51 cm,墙厚可达1.0 m,孔斜小于或等于1%。钻喷一体化高喷工艺进行了单管法单旋孔和双管法套接孔的试验。通过挖桩检查,单管法桩径较小,双管法连体桩墙厚可达1.93~2.14 m,孔斜精度满足设计要求。自凝灰浆防渗墙工艺则是在室内配合比试验的基础上,进行现场试验,通过开挖检查,墙体厚度可满足0.8 m及1.0 m的要求,强度接近 $R_{28} \geq 0.5 \text{ MPa}$ 。需再继续试验,以满足 $R_{28} \geq 0.5 \text{ MPa}$ 的设计要求。

3.2 施工方案确定

经专家组对试验结果评审后认为:4种施工工艺均可用于三期土石围堰防渗墙施工,其中上游围堰宜采用‘自凝灰浆+常规钻孔高喷+钻喷一体化高喷’的施工方案,下游围堰宜采用‘振孔高喷为主,辅以常规钻孔高喷’的施工方案^[2]。

上游土石围堰右侧非龙口段及部分深墙段布置自凝灰浆成墙工艺,施工轴线长度为170 m;右接头与导流明渠混凝土斜坡相接,布置入岩效果较好的常规钻孔高喷工艺。围堰左侧部分深墙段、龙口段及左岸接头区布置常规钻孔高喷和钻喷一体化高喷工艺,施工轴线长246.78 m;考虑钻喷一体化高喷是新工艺,将其布置在常规钻孔高喷工艺中间,便于出现问题时由两侧补救。

由于下游土石围堰高喷墙设计为双排孔,常规

钻孔高喷设备分排分序施工移动耗时多,为充分发挥振孔高喷工艺施工速度快的优点,并结合其施工深度有限的特点,在围堰右侧浅墙区布置振孔高喷工艺,施工轴线长度为211.8 m;围堰右侧深墙区及左、右接头区均采用常规钻孔高喷工艺。

4 施工方法及应用效果分析

4.1 施工设备配置

根据施工方案所确定的工艺组合及试验所得的工效参数,上游围堰配备2个自凝灰浆机组,包括2台抓斗、2台挖掘机和4个7 t重锤;6个常规钻孔高喷机组,包括6台高喷台车,12台地质钻机;2个钻喷一体化高喷机组,包括2套一体化机具。下游围堰配备3个振孔高喷机组,包括3套振孔高喷机具;2个常规钻孔高喷机组,包括12台高喷台车,24台地质钻机。

4.2 施工工艺参数

上、下游土石围堰防渗墙施工的工艺参数见表1和表2。

表1 上游土石围堰防渗墙自凝灰浆原浆配合比 kg/m³

编号	水	水泥	膨润土	缓凝剂	分散剂
Z-2	907	236	45	0.7~0.9	1.8
Z-3	900	254	45	0.7~0.9	1.8

4.3 施工工艺应用效果

4.3.1 工效分析

三峡三期围堰防渗墙工程于2002年10月25日开工,至12月10日完工,历时45 d,实际成墙面积22 653.2 m²,其中振孔高喷工艺成墙面积6 019.5 m²,常规钻孔高喷工艺成墙面积12 964.6 m²,钻喷一体化高喷工艺成墙面积934.7 m²,自凝灰浆防渗墙施工工艺成墙面积2 734.5 m²。从工效来看,振孔高喷工艺的单机台班工效为:成孔42.8 m,喷浆25.3 m;钻喷一体化高喷工艺的单机台班工效为:成孔29.3 m,喷浆21.8 m;常规钻孔高喷工艺的单机台班工效为:成孔9.9 m,喷浆22.1 m。就成孔工效比较,振孔高喷最好,常规钻孔高喷最差。

自凝灰浆防渗墙施工工艺的施工工效为:风化石层为53.60 m²/台班,全风化层为5.86 m²/台班,强风化层为2.06 m²/台班。

表2 土石围堰防渗墙施工工艺参数

施工工艺	项 目	压力/MPa	风量/(m ³ ·min ⁻¹)	流量/(L·min ⁻¹)	提升速度/(cm·min ⁻¹)	浆液密度/(g·cm ⁻³)	旋转速度/(r·min ⁻¹)	喷嘴直径/mm
常规钻孔高喷(上游)	压缩气	0.8~1.2	1.0~3.5	85~150	10~15	1.40~1.45	10~15	2.0
	浆 液							
钻喷一体化高喷(上游)	压缩气	0.8~1.2	1.0~3.5	85~150	10~13	1.40~1.45	10~13	2.3
	浆 液							
振孔高喷(下游)	压缩气	0.7~1.2	1.5~3.0	>140	10~30	1.40~1.45	15~25	1.9~2.9
	浆 液							

(下转第95页)

[30] DEY S. Experimental study on incipient motion of sediment particles on generalized sloping fluvial beds[J]. International Journal of Sediment Research, 2001,16(3) 391-398.

[31] OLSEN N R B. 3D CFD modeling of a self-forming meandering channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,129(5) 366-372.

[32] FRIEDKIN J F. A laboratory study of the meandering of alluvial rivers [R]. Mississippi: US Army Engineer Waterways Experiment Station,1945.

[33] RUETHER N, OLSEN N R B. CFD modeling of meandering river evolution[C]//GANOULIS J,PRINOS P. Proceeding of 30st IAHR Congress. Thessaloniki, Greece,2003.

[34] RUETHER N, OLSEN N R B. Advances in 3D modeling of free-forming meander formation from initially straight alluvial

channels[C]//BYONG H J, SANG L, WON S,et al. Water engineering for the future : choices and challenges Proceeding of 31st IAHR Congress. Seoul,Korea,2005 1465-1472.

[35] ABAD J D, GARCIA M H. Hydrodynamics in Kinoshita-generated meandering bends : importance for river-planform evolution[C]//River, Coastal and Estuarine Morphodynamics : RCEM 2005. London : Taylor & Francis Group, 2006 761-771.

[36] BECK S M. Computer-simulated deformation of meandering river patterns [D]. Minnesota : University of Minnesota, 1988.

[37] 黄国鲜. 弯曲和分叉河道水沙输运及其演变的三维数值模拟研究[D]. 北京 清华大学,2006.

(收稿日期 2006-09-02 编辑 马敏峰)

(上接第 73 页)

曹娥江大坝的 C_0 值。取样地点在标高 5.0 m(黄海标高,浪溅区)处,所测得的水溶性氯离子质量分数为 0.34%,所以取 $C_0 = 0.34\%$ 。钢筋腐蚀开始时临界氯离子质量分数可取为砂浆质量的 0.18%。 x 为保护层厚度,分别取 40 mm 和 60 mm 时,基于室内氯离子有效扩散系数的工程预测寿命见表 5。

由表 5 可知,当保护层厚度为 40 mm 和 60 mm 时,I 号配合比的普通混凝土预测寿命最短,分别只有 17 a 和 49 a,是难以保证工程百年耐久性的。IV 号配合比的高性能混凝土预测寿命最长,分别达到 384 a 和 1 223 a。基于室内氯离子有效扩散系数的工程预测寿命表明,高性能混凝土能显著延长工程寿命。

表 5 基于室内氯离子有效扩散系数的工程预测寿命

配合比编号	工程预测寿命/a	
	保护层厚度 40 mm	保护层厚度 60 mm
I	17	49
II	233	743
III	128	409
IV	384	1223
V	156	497

5 结 论

高性能混凝土的氯离子有效扩散系数在 $0.91 \times 10^{-12} \sim 1.96 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间,小于普通混凝土,具有比普通混凝土更好的抗氯离子侵蚀性能。高性能混凝土有助于提高混凝土耐久性能,延缓钢筋锈蚀,显著延长曹娥江大坝的工程寿命。

参考文献:

[1] 浙江省曹娥江大坝枢纽工程可行性研究报告[R]. 杭州:浙江省水利水电勘测设计院,2003.

[2] GB 50021—2001,岩土工程勘察规范[S].

[3] GB 175—1999,硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥[S].

[4] GB 1718736—2002,高强高性能混凝土用矿物外加剂[S].

[5] JTJ 270—98,水运工程混凝土规程[S].

[6] MANGAT P S, MOLLOY B T. Prediction of long term chloride concentration in concrete [J]. Materials and Structures, 1994, 27 338-346.

[7] DL/T 5150—2001,水工混凝土试验规程[S].

[8] 胡红梅,马保国. 矿物功能材料对混凝土氯离子渗透性的影响[J]. 武汉理工大学学报,2004,26(3) 19-22.

[9] 胡彦军. 掺合料混凝土氯离子渗透快速试验校正及渗透性能规律研究[D]. 南京 南京水利科学研究院,2003.

(收稿日期 2006-02-21 编辑 熊水斌)

(上接第 66 页)

4.3.2 质量分析

通过对防渗墙进行墙体钻孔检查和墙体注水试验,钻孔取芯的芯样获得率可达 91.4%;注水试验测得最大渗透系数为 $1.16 \times 10^{-6} \text{ cm}$,满足设计值 $K_{20} \leq 1 \times 10^{-5} \text{ cm}$ 的要求。

三期土石围堰防渗工程完工后,经抽水检验,围堰的最大渗漏量为 350 L/h,满足设计要求,证明墙体质量优良。

综上所述,三峡三期土石围堰防渗墙施工所选择的成墙工艺实用有效,施工方案正确合理;4 种成墙工艺在施工中各显神通,成墙质量好,施工速度快,为三峡工程三期基坑提前闭气抽水及 RCC 围堰的尽早施工创造了良好的条件。

参考文献:

[1] 水利水电工程施工手册编委会. 水利水电工程施工手册 第 1 卷:地基与基础工程[M]. 北京:中国电力出版社,2004 371-372.

[2] 中国葛洲坝集团公司. 三峡工程施工技术:二期工程卷 [G]. 北京:水利电力出版社,2003 672-676.

(收稿日期 2006-04-05 编辑 熊水斌)