

三峡深水高土石围堰工程科技创新

戴会超

(中国长江三峡工程开发总公司, 湖北宜昌 443002)

[摘要] 三峡二期深水高土石围堰是一项具有挑战性的高难度工程项目, 其面临的技术难题远远超过国内外同类工程的水平。在1998—2002年4年多的运行中, 围堰保护了左岸大坝和厂房的施工基坑, 并经受了1998年长江大洪水的考验, 使二期工程得以顺利建成。二期围堰工程质量优良, 圆满地完成了历史任务。文章从试验研究、设计施工、组织管理、安全监测及运用后拆除等各个方面进行了全过程、全方位的系统介绍。

[关键词] 三峡工程; 深水高土石; 围堰; 设计施工

[中图分类号] TV551.3; T-19 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)07-0011-06

1 前言

三峡工程二期深水高土石围堰(以下简称围堰)是三峡工程最重要的临时建筑物之一。最大堰高82.5 m, 挡水深度60 m, 设计最大蓄洪量 $20 \times 10^8 \text{ m}^3$; 围堰地质地形条件复杂, 施工难度大, 要求在一个枯水期内建成。从围堰的技术难度以及重要性看, 在国内外围堰史上是史无前例的。因此, 围堰设计和实施成为三峡工程重大关键技术项目, 被列为必须进行单项技术设计的8个项目之一。

围堰设计的实质问题是如何在深水抛填的散粒料中和复杂地质条件下, 快速建成一座具有可靠防渗体系的满足安全运用要求的大型土石坝。围堰所面临的技术难题主要有: 断面结构和防渗型式的选择; 60 m水深下抛填风化砂密度的确定; 深槽、陡坡、硬岩防渗墙的施工技术及工效; 新型柔性墙体材料研制及其质量控制方法; 新淤砂的动力稳定性及其处理; 大规模施工中的管理问题, 等等。这些技术问题均无先例, 只有通过科学研究和试验才能解决。为此, 在国家“七五”、“八五”科技攻关以及三峡工程技术设计和施工阶段科研等项目安排了一系列课题进行研究。

围堰项目的研究及其使命的完成历时18年。其中, 11年基本上为试验研究与设计阶段, 3年主要为实施阶段, 4年半为运用阶段。前期初步设计(1985年以前)对围堰的型式和断面结构进行数值分析和方案对比。“七五”期间, 对围堰填料性质、60 m水下抛填的风化砂密度、断面型式等技术难题进行了研究; “八五”期间, 对新淤砂动力特性、防渗新材料、风化砂水下加密工艺、防渗墙造墙设备的研制和改进等进行了攻关; 实施阶段(1996—1998年), 对水下振冲压密技术、防渗墙施工质量控制等问题进行了现场试验研究; 运行和拆除阶段(1998—2002年)的研究工作包括运行期的监测和反馈分析, 最后结合围堰拆除又进行了大量的科学试验工作, 验证围堰设计、研究和施工的可靠性、有效性和合理性。

2 围堰特点

1) 施工水深大, 挡水水头高。葛洲坝水利枢纽的兴建, 抬高了三峡坝址区施工期水位, 二期围堰最大填筑水深达60 m, 最大挡水水头超过75 m, 防渗墙最大高度74~84.5 m(不同防渗方案), 在世界围堰史上均属罕见。

[收稿日期] 2003-01-27

[作者简介] 戴会超(1965-), 男, 河北保定市人, 博士, 中国长江三峡工程开发总公司高级工程师

2) 工程规模巨大, 工期短。二期上、下游围堰轴线全长达 2 440 m, 最大堰高约 80 m, 土石方填筑总量为 $1\ 100 \times 10^4\ \text{m}^3$, 混凝土防渗墙面积约为 $10 \times 10^4\ \text{m}^2$, 远超过国内外已建的同类工程规模; 围堰施工按三峡工程控制性进度要求, 必须在一个枯水期内建成并实现基坑抽水目标, 施工强度很大。

3) 地地质条件复杂。围堰地基存在新淤积砂, 基岩深槽陡坎, 块球体地层及裂隙渗漏等重大工程地质问题, 给围堰地基处理、防渗设计与施工带来很大困难。

4) 围堰施工与长江航运关系密切。与国外大多数围堰施工条件不同, 围堰截流施工初期, 导流明渠尚不具备通航条件, 因此, 围堰初期截流筑堤进占, 必须同时考虑大江航运问题。

5) 三峡坝址附近天然砂砾石、粘土料等十分缺乏, 主要填料只能取自一期工程左右岸的开挖料, 包括风化砂、石渣、块石及混合料等, 限制了围堰填筑断面型式的选择。

6) 二期基坑施工时间长 (1998 年 9 月至 2002 年 9 月)。二期上、下游围堰全年挡水运行, 运行过程中需考虑导流明渠过流围堰的影响。

3 围堰主要研究内容和创新点^[1]

本文从围堰试验研究、设计施工、组织管理、安全监测及运用后拆除等各个方面进行了全过程、全方位的系统研究并付诸实施, 获得成功。以下从 10 个方面论述项目的主要内容和创新点。

3.1 围堰断面结构型式安全可靠

三峡工程二期深水围堰设计的实质问题是在深水抛填的散粒料中和复杂地质条件下, 快速建成一座具有可靠防渗体系的、满足安全运用要求的高土石坝。因此选定技术可靠、经济合理、施工可行的围堰断面型式至关重要, 而作为围堰生命线的防渗结构则是重中之重。

针对围堰挡水水头高 (80 m), 施工水深大 (60 m), 堰体 80 % 在水下填筑, 堰基存在淤砂、残积块球体和坡度达 75° 以上的岩石陡壁, 以及要求在一个枯水期达到度汛高程等特点。经过多方案的比较研究, 确定在深水抛填风化砂和砂砾石堰体中建造深度达 74 m 的双排塑性混凝土防渗墙 (总面积 $8.4 \times 10^4\ \text{m}^2$), 运用实践证明围堰结构安全可靠、先进合理, 见图 1。

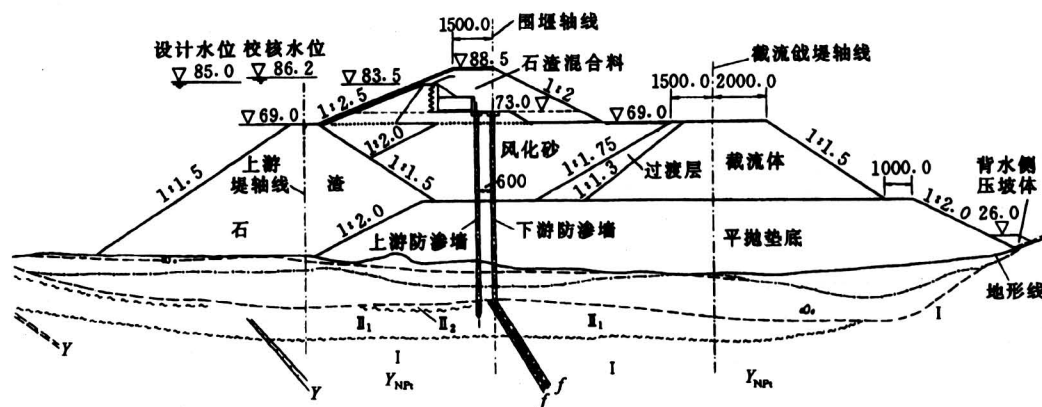


图 1 三峡二期深水上游围堰典型剖面图

Fig.1 2nd stage deepwater cofferdam of Three Gorges Project

3.2 围堰工程质量优异

围堰最大高度 82.5 m, 总填筑量达 $1\ 032\ \text{m}^3$ 。在围堰施工过程中, 采用运筹学和计算机辅助决策系统, 建立了科学的项目管理模式, 为围堰的快速施工提供了有力保障。围堰的工程质量优异, 经受了 1998 年大洪水的考验, 围堰实测渗流量仅为 65 L/s, 远低于设计预计值, 为同类大型土石围堰中所罕见。

3.3 利用离心模型试验确定 60 m 水深下抛填风化砂的设计参数

在任何土木工程结构物的设计中, 材料的密度是一项最基本的、必不可少的设计参数, 而且它往往是已知的或很容易求得的。然而对本工程而言, 在 60 m 水深下确定风化砂抛填料的密度并非易事。进行 60 m 水下的测量很困难, 国内外也无类似经验数据可以参考。为了解决这个拦路虎, 1959

年，中国水科院、长江科学院选定在三峡现场的石板溪拦沟蓄水，进行过在6 m水深下人工抛风化砂的试验，但所得的干密度很小（平均仅1.45 t/m³左右）。按此干密度进行设计的防渗墙的水平变形很大（达1.2 m），围堰设计断面的方案不能过关。此问题一直困惑设计多年，工作难有实质性的进展。

为了合理确定堰体风化砂的关键设计参数，本项目采用先进的离心模拟技术进行堰体风化砂抛填密度和坡角的研究，在国内外尚属首次。得到的60 m水深下抛填风化砂的密度为1.75~1.85 t/m³、水下稳定坡角约27°的成果经三峡一期围堰验证正确，解决了深水围堰设计的一大关键技术问题。

3.4 应力应变有限元分析的应用与发展

围堰的数值分析工作从1984年开始到2000年结束，在长达17年的历程中，数值分析工作跟踪设计和建设全过程，在围堰型式选择、断面结构论证、墙体材料性能指标确定、单双墙连接段可靠性分析、动力条件下的稳定性分析、1998年洪水期间围堰安全性评价、防渗墙运用期的监测资料分析等问题上，都进行了大量的分析研究，在设计优化和指导施工方面发挥了重要作用。

应力应变有限元分析在三峡围堰中采用了特别的方式，发挥了独特的作用，其成果不仅有实际价值，而且在技术上也有不少创新。由于围堰本身的复杂性，围绕堰体材料分区、墙体结构型式（高低墙、单双墙、刚性柔性墙）等，先后提出的几十种围堰结构方案，每一种方案的取舍基本上都是依据有限元数值分析的成果，包括墙体材料设计参数（强度、模强比）的确定。数值分析在围堰结构优化方面所带来的经济效益也相当可观。可以说采用敏感性分析方法进行围堰结构优化在三峡围堰工作中体现得十分充分。通过三峡围堰数值分析工作，增加了数值分析方法在工程中的可信度和应用价值，同时也促进了有限元方法和计算技术的发展。对于今后在工程中更广泛地应用数值分析方法起了很好的推动作用。

3.5 柔性墙体材料的研制和施工控制方法的发展

鉴于围堰堰高、变形大，经过长期研究，确定防渗墙墙体材料采用塑性混凝土，其技术参数为：抗压强度 $R_{28} = 4 \sim 5$ MPa，抗折强度不小于1.5 MPa，初始切线模量1 000 MPa左右，渗透系数小

于 10^{-7} cm/s，渗透破坏比降不小于80。当时国内外相关工程中所应用的塑性混凝土尚无全面达到上述指标的材料，有的切线模量虽然可低到200~500 MPa，但抗压强度一般仅在0.2~2 MPa，不能满足三峡深水围堰防渗墙的设计要求。显然，对三峡深水围堰防渗墙的塑性混凝土的研究，必须有一个新的跨越。此外，制作塑性混凝土需要大量的砂石骨料，在围堰施工中，长江天然河砂料源不足，而在工程施工开挖中有大量的花岗岩风化砂弃料，同时，在古树岭人工骨料系统，在生产碎石后也有大量粒径小于5 mm的弃料，为此，研究了利用工程废弃料配制塑性混凝土的可能性。

经过10余年的研究，在简化传统塑性混凝土原材料（用工程弃料代替砂石骨料）的基础上，研制成功塑（柔）性混凝土（统称柔性墙体材料）。通过大量的研究和生产性试验，优化配合比，使各项指标满足深水围堰防渗墙“高强、低弹、抗渗”的设计要求，并采用了先进的干掺拌和工艺。柔性墙体材料就地取材，性能良好，具有显著的经济效益和环保效益。可以认为，柔（塑）性墙体材料的研究成功和应用是三峡围堰中的一项重大创新。

3.6 振冲措施在水下风化砂体加密中的应用

风化砂堰体的密度是保证防渗墙造孔的成功和防渗墙工作状态良好的重要条件。采用大功率振冲加密深水抛填风化砂，振冲影响深度达30 m，深水抛填风化砂密度 ρ_d 在离心模型中的研究成果1.75~1.85 g/cm³基础上，实际提高到平均 $\rho_d = 1.934$ g/cm³，适应防渗墙高效造孔机器施工，又大大减少了工程运行期的堰体变形，降低工程防洪度汛风险。可以说围堰的顺利施工和正常运用，在一定程度上得益于振冲措施加密了堰体的密度。在围堰的振冲措施中采用了国内最大功率（150 kW）的振冲器，振冲的深度（30 m）和规模也是国内所未有过的。

3.7 新淤砂和风化砂动力特性研究及其综合处理

本项目对新淤砂和风化砂动力特性的研究工作相当充分，除室内进行抗液化试验和动力特性（动模量、动阻尼比、动强度等）之外，还进行了稳态强度的研究和分析。对淤砂的地震动力特性和抗液化性能获得了新的认识，并在此基础上提出了围封和压盖的新措施，取得了成功，避免了直接挖除淤砂的巨大工作量，简化了工程，节省了大量资金，也为今后其他类似工程提供了经验。

爆破条件下新淤砂和风化砂的动力反应是一项全新的工作,以往国内外均无人研究过,本次研究从研制模拟爆破荷载的专用三轴仪开始,对爆破荷载下的动力响应、动孔压的发展规律、动力强度特性以及围堰在爆破作用下的稳定性等方面进行了研究,而且还在爆破现场进行了实测,并将其用于动力稳定分析。这样,不仅对工程的安全性进行了论证,而且也获得了爆破这种特殊的动力荷载对材料性质和工程影响的新的认识,很有新意。

3.8 粗粒料性能的研究

围堰有多种填料,其中粒状材料的种类较多且主要是墙料,它们的颗粒尺寸往往很大。过去试验中通常是简单地将超径颗粒去掉,或作一些简化的级配处理。这对于不太重要的中小型工程还可以,但是对于三峡工程来说则显得粗糙,不宜照搬。为此,长江水利科学研究院研制了一系列大型仪器,其中最主要的是试样尺寸为 $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的大型平面应变仪,还筹备了试样直径 500 mm 、高度 $1\ 000\text{ mm}$ 的大型叠环式渗压固结仪,为国内仅有,在世界上也属少数几个大型仪器之一。利用这些仪器进行了粗颗粒破碎及其对强度特性影响的研究,并建立了新的能比方程来表达破碎的强度分量,对粗粒料的特性做了比较深入的理论研究,这也是一项以往研究不多的新研究成果。

3.9 研制新的施工设备,开发防渗墙新的施工方法和工艺技术

三峡围堰防渗墙,墙高、地层复杂、造墙面积 $8.4\times 10^4\text{ m}^2$,大部要求在大江截流后一个枯水期完成,其综合施工难度为国内外罕见。

复杂地层中造孔成槽工艺是防渗墙施工的重中之重,而施工机具则是重要前提。本项目研究制造了具有国际先进水平的施工设备和配套机具,如CZF系列的反循环钻机、重型机械式抓斗、超声波测井仪等,通过大规模生产性试验,并引进部分国外先进设备,确定了设备的最优组合方案。根据设计参数和技术要求,提出了最佳的施工方案和施工参数,主要有:大功率大深度(30 m)风化砂振冲加密技术;复杂地层的防渗墙成槽工艺,如“铣削法”、“铣砸爆法”、“铣抓钻法”等;陡坡及硬岩槽内钻孔爆破技术;防渗墙槽孔检测方法;深槽内预埋灌浆管技术;深槽混凝土浇筑技术。上述工艺和技术成功地解决了花岗岩块体层及高差大于 30 m 、坡度 $70^\circ\sim 80^\circ$ 、双向陡坡基岩以及抛填

风化砂的成槽难题,创造了复杂地基深防渗墙月施工强度 $13\ 000\text{ m}^2$ 的新纪录。

3.10 围堰拆除过程中工程性状的验证分析

围堰从设计、研究、实施、运行到拆除的全过程,实质上是完整的原型土石坝工程试验过程。本项目在围堰拆除过程中专门进行了围堰工程性状的实录和验证,对围堰和防渗墙进行了全面的检查、取样和分析。检测结果表明,堰体风化砂密度高于设计值,塑性混凝土防渗墙完整,各项指标优于设计值,证明围堰的勘测、科研、设计、施工是完全成功的。同时还发现了一些重要的现象。将围堰拆除中所取得的十分宝贵的原型资料与围堰建设前的研究成果、建设中的检测成果、运行期的监测成果进行了系统的比较、验证和分析。这些验证分析成果不仅使围堰的研究工作变得十分完整,而且证实了以往的围堰研究工作的真实性和有效性,同时对进一步总结围堰的成功经验起了重要的作用,对类似工程具有很大的指导作用。

4 与国内外同类研究的综合比较

鉴于围堰的技术复杂性及其重要性,围堰设计过程中对国外同类工程进行了广泛调研,其中与三峡围堰结构及规模相近的部分围堰或土石坝工程有:葛洲坝大江上游围堰、龚嘴围堰,契尔克伊、阿克苏布围堰和依泰普围堰等,各工程技术指标如表1。与同类工程相比:

1) 围堰迎水面水下抛填防渗土料作斜墙和铺盖的防渗形式国内外有丰富的经验和成功实例,如美国达列斯坝、加纳的阿克苏布围堰,我国葛洲坝二期下游围堰等均属此种类型。由于三峡工程附近缺乏土料,舍弃了此种防渗型式。

2) 依太普围堰最大堰高近 80 m ,水下最大填筑深度 $40\sim 50\text{ m}$,河床覆盖层水下清基水深为 60 m ,达列斯堆石坝高度达 90 m ,水下抛填深度 55 m ,工程规模及施工难度与二期深水围堰相当。但依太普围堰施工历经两个枯水期,达列斯堆石坝也花了2年时间完成水下抛填,而三峡围堰施工期为一个枯水期,施工难度更大。

3) 在水下抛填透水堰体和透水地基建造成防渗墙的工程实例很多,世界上最深的防渗墙为加拿大马尼克三号坝,墙深达 131 m ,但大部分是在河床密实的砂卵石覆盖层中造墙,而在较松散的水下抛填料中造孔成墙达 70 m 以上的工程除三峡围堰

外，尚无先例。

4) 国内外许多工程水下抛填堰体大多采用级配良好的砂卵石料，有的还专门进行级配优化工艺，能达到较高的密实度。而三峡围堰水下采用风化砂填筑，堰体密实度较低，在松散的风化砂堰体

内建造防渗墙，是其他工程所未有的。

5) 三峡围堰土石方填筑，在每个工作面上的抛填强度较大；防渗墙高峰期月强度要求在 8 500 m³ 左右，这样的施工水平在国内尚无先例。

表 1 国内外深水围堰和水中直接建坝工程实例

Table 1 The practical examples of deep water cofferdam and dam construction direct in water projects internal and external

工程项目	施工时段 / 年份	最大堰高 / m	挡水水头 / m	基础地质	堰体填料	防渗系统	工程规模
长江葛洲坝大江围堰	1981	39~42	30~45	砂砾石	堆石、砂砾石、混合料、反滤料	双排混凝土防渗墙 墙厚 0.8 m	填筑量 274 × 10 ⁴ m ³ ; 防渗墙 5.1 × 10 ⁴ m ²
岷江龚嘴水电站二期上游围堰	1967	35	60 左右	砂卵石、泥砂卵石和碎石	石渣混合料、砂砾石	混凝土防渗墙上接木板心墙 防渗墙最大深度 45 m	
闽江水口水电站二期围堰	1989		67	砂砾石	砂砾石	塑性混凝土防渗墙上接土工膜心墙 防渗墙厚 0.8 m, 墙深 44.0 m	防渗墙 1.0 × 10 ⁴ m ²
黄河龙羊峡水电站围堰		58			堆石	混凝土心墙, 顶宽 1.0 m, 底宽 2.0 m	
依泰普二期围堰(巴西—巴拉圭)	1978	80		细砂砾、漂砾(水下清淤)	堆石、粘土、过渡料	粘土心墙(水下施工)	填筑量 960.1 × 10 ⁴ m ³ ; 日最大填筑 14 × 10 ⁴ m ³
契尔克伊围堰(苏联)	1965—1967	58.5		岩石	爆破堆石	天然混合料天然淤填	
阿特巴申斯克坝(苏联)	1970—1972	77.8		砂卵石	爆破堆石、堆石、砾卵石土	灌浆帷幕上接聚乙烯土工薄膜心墙	
阿克苏布围堰(加纳)	1961—1965	68.8		冲积沙沉积层	抛石	水下清除砂层抛填 3~4 层级配料闭气	
达列斯土石坝(美国)	1957	90		基岩大断层填砂砾石	采石场石料、碎石、砾石	级配良好的砂砾石混合料斜墙及铺盖	

5 结论^[2,3]

围堰在建设过程中，于 1998 年汛期就开始直接挡水了。并经受住了当年大洪水的考验，防渗墙工作正常，“固若金汤”。

2002 年 5 月和 7 月，二期上下游围堰先后拆除至破堰，上下游基坑先后进水，标志着围堰胜利完成历史任务。在 1998 年至 2002 年汛期前的 4 年多的运行期中，围堰没有出现危及安全的问题，很好地完成了保证左岸基坑主体工程顺利施工和坝址下游安全的重任，达到了设计的要求，它是三峡工程中质量最好的单项工程之一。在深水抛填风化砂和砂砾石堰体中建造深度达 74 m 的双排塑性混

凝土防渗墙，围堰的工程质量优异，实测渗流量仅为 65 L/s，为同类大型土石围堰中所罕见。首次用离心模型试验新技术确定了 60 m 水深下抛填风化砂的密度为 1.75~1.8 t/m³、水下坡角约 27° 的成果，解决了深水围堰设计的一大关键技术问题。数值分析工作跟踪设计和建设全过程，在优化设计和指导施工方面发挥了重要作用。利用风化砂和工程弃料研制成功满足深水围堰防渗墙“高强、低弹、抗渗”设计要求的柔性墙体材料，在国内外大型工程中尚属首次使用。研究制造了具有国际先进水平的施工设备和配套机具，解决了花岗岩块球体层及高差大于 30 m、坡度 70°~80°、双向陡坡基岩以及抛填风化砂的成槽难题，创造了复杂地基身防渗

墙月施工强度 13 000 m² 的新纪录。在围堰拆除过程中,对围堰和防渗墙进行了全面的检查、取样和分析,证明围堰的勘测、科研、设计、施工是完全成功的,对类似工程有借鉴作用。

参考文献

[1] 中国长江三峡工程开发总公司,等.三峡工程深水高

土石围堰的研究与实施[R].2002.358~359

[2] 潘家铮.对二期围堰的评价[J].中国三峡建设,1999,(5):1~3

[3] 王家柱.二期横向围堰工程几个主要技术问题[J].中国三峡建设,1999,(5):4~7

Science and Technology Innovation of the Deep Water High Earth-rock Cofferdam in the Three Gorges Project

Dai Huichao

(China Yangtze Three Gorges Project Development Corporation, Yichang, Hubei 443002, China)

[Abstract] The deep water high earth-rock cofferdam in the 2nd phase construction of TGP is a hard and challenge project, whose degree of difficulty in the technological problems is much harder than that of the similar projects. During the period from 1998 to 2002, the cofferdam protected the construction pit of the left-bank dam and powerhouse, stood the test of the heavy flood in 1998, and made the 2nd stage construction completed smoothly. The quality of the cofferdam is good, and it fulfilled the historical tasks satisfactorily. The article introduced the whole course of the systematical research through the aspects of the experimental research, the design and construction, the organization and management, the safety monitor and the cofferdam demolition etc.

[Key words] TGP; deep water high earth-rock; cofferdam; design construction