

三峡工程二期围堰建设中的科技创新

张小平¹, 包承纲², 施 斌³

(1. 南京航空航天大学土木工程应用技术研究, 江苏 南京 210016; 2. 长江科学院, 湖北 武汉 430010;

3. 南京大学地球科学系, 江苏 南京 210093)

摘要: 简要介绍三峡工程二期围堰建设中所应用的新技术、新材料、新工艺, 包括离心模型试验, 复合土工材料, 废料柔性混凝土, 数值模拟技术和防渗墙成墙新工艺等。这些科技创新技术的采用, 使二期围堰得以克服所有技术难关, 优质、高效、安全地建成。

关键词: 围堰; 离心试验; 柔性混凝土; 防渗墙; 三峡水利枢纽

中图分类号: TV551.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2002)06-0004-04

三峡工程二期围堰(以下简称二期围堰)顺利完建, 经受了 1998 年汛期 8 次特大洪峰的考验, 为三峡工程今后的顺利建设奠定了基础。在极其严峻的水文、地质、工期条件下, 二期围堰的建成, 标志着中国水利建设又登上新的台阶, 跻身国际先进水平^[1]。

二期围堰的顺利完建, 是集体智慧的结晶, 是科技创新在水利建设中起到重要作用的一个高度浓缩。二期围堰规模大, 技术复杂, 任务艰巨, 担负着航运和下游安全的重要任务, 多年来一直是有关领导、业主和建设者各方高度重视和担心的一座建筑物。二期围堰的关键技术问题之所以得以解决, 重要的是依靠大量的科学研究和创新以及高水平的组织管理和协调。这些科研工作针对围堰存在的问题而进行, 采用国内外的先进技术以及新方法、新材料和新工艺, 并在应用中发展了这些新技术, 达到事半功倍的效果, 不仅解决了技术难题, 而且加快了工程进度, 节约了投资。据粗略估计, 科研花费的资金不到经济效益的 10%, 充分体现了“科学技术是第一生产力”的论断。本文通过二期围堰新方法、新技术、新材料和新的科研成果的应用, 揭示了科技创新在水利建设中的重要作用和意义。

1 二期围堰的主要特点

二期围堰担负着二期工程施工期间保障大江基坑常年施工的任务, 最大堰高 82.5 m, 设计拦洪量 20 亿 m³, 运行中绝对不容许出事, 否则不仅给整个工程建设造成不可估量的损失, 还将严重威胁下游安全。

二期围堰的主要特点有^[2]:

a. 围堰规模名列世界前茅, 最大堰高 82.5 m,

土石方总填筑量达 1 220 万 m³, 防渗体总面积达 20 万 m², 其中混凝土防渗墙近 10 万 m²。

b. 堰址水深达 60 m, 约 2/3 的堰高在水下施工, 难度很大。

c. 堰址地质情况复杂, 覆盖层中有块球状孤石, 表面有粉细沙层, 地形起伏大, 有深槽和陡坡, 不利于防渗墙的施工。

d. 根据现场情况, 只能采用风化砂作主要填料, 水下抛填时结构松散, 难以密实, 物理力学指标差, 围堰变形大。

e. 必须在一个枯水期内完成, 施工强度高, 月填筑强度超过 300 万 m³, 月成墙强度近 1.3 万 m³。

在设计和施工中需要解决的主要问题有:

a. 围堰断面的优化设计以及防渗墙结构的优化设计。

b. 二期围堰混凝土防渗墙总面积近 10 万 m², 且围堰大部分为水下施工, 密实度较低, 对防渗墙造孔孔壁不利, 如何采用各种有效技术和手段, 加快施工进度, 保证质量。

c. 防渗墙施工要穿过堰体及河床覆盖层造孔, 堰体松散, 覆盖层中有块球体甚至有块球体密集带, 如何克服钻进中的困难。

d. 防渗墙墙体的材料问题。

以上这些关键性问题, 均需在设计、施工中进行大量的科研工作, 采用科学试验的成果以及先进的高新技术, 才能得到攻克和解决。

2 科技创新的应用

2.1 离心试验技术的应用

二期横向围堰填筑量巨大, 三峡坝区花岗岩风

化砂储量丰富,工程建筑物基础开挖也有大量的风化砂弃料可以利用.三峡坝区风化砂主要矿物成分为正长石、石英、斜长石、云母等,其中云母含量约10%,属一般花岗岩风化料.天然情况下,风化砂中大于5 mm的颗粒含量30%~60%,天然含水量5%~11%,比重2.76,天然干密度 $1.65 \sim 2.0 \text{ t/m}^3$.干填碾压的风化砂干密度可达 1.90 t/m^3 以上,具有良好的物理力学性能.故以风化砂作为围堰堰体的主要填料,是设计首选的方案.但二期围堰堰体方量80%处于水下,最大施工水深达60 m,无法进行碾压作业.深水抛投的风化砂在未经碾压条件下的性状,能否保证高达80 m的围堰的安全稳定运行,是二期围堰研究的重点课题之一.

风化砂的水下抛填密度和水下稳定坡角是影响堰体结构型式和防渗墙设计参数的主要因素,为此,长江科学院于1959年在坝址右岸石板溪拦沟蓄水,进行了6.0 m水深下人工挑土的现场抛填试验,所得的干密度很低,仅 $1.40 \sim 1.45 \text{ t/m}^3$,按此计算混凝土防渗墙顶部的水平位移达1.2 m左右,墙的应力应变状况不佳.这样就大大增加了断面结构的复杂性,使施工难度和工程造价随之大幅增加,方案难以成立.但当时没有其它计算和模拟的方法和手段.20世纪70年代,离心机模拟技术在国外开始发展.其原理是:将缩小尺寸的模型置于高速转动的离心机中,借助离心加速度来补偿因几何尺寸缩小引起的自重应力损失,能使模型的自重应力场与原型一致.对于以自重应力为主的土工问题,离心模型试验提供了一个可靠的研究方法.20世纪80年代,长江科学院建成了国内首台6 m直径的离心机土工试验台,成为研究三峡围堰风化砂填料性质的主要手段.采用离心模型试验技术,得到水下抛填干密度达 $1.67 \sim 1.75 \text{ t/m}^3$,水下坡角为1:2,使风化砂的坡角由原来的1:3.5改为1:2,这一结果大大简化了围堰断面结构和工程量,从而带来可观的经济效益和社会效益.同时,试验结果的可靠性也已为一期围堰的实践所证实.根据这一成果所得的围堰断面,再用有限元方法进行围堰的应力变形分析,又为防渗墙的结构设计提供了依据.对防渗墙的参数选取考虑了多种可能情况,得出不同情况下防渗墙体可能受到的最大拉压应力和变形,然后,对墙体的安全裕度、取材、施工和造价等各方面因素进行综合比选,提出了防渗墙的设计参数.

2.2 新材料的应用

2.2.1 复合土工材料的研究及应用

围堰防渗是土工膜应用的合适场所.土工膜防渗性好,适应变形能力强,施工简便,拆除容易.且围

堰是一个临时性建筑,不存在老化问题.“八五”攻关期间的研究表明,复合土工膜(二布一膜)的性能并不是土工膜和无纺织物的简单叠加,而是更优一些.研究中对它的设计方法也提出了新的建议.二期围堰共使用复合土工膜约 6 万 m^2 ,均是国内生产.

对复合土工膜的材料特性进行了研究,了解了复合膜整体的力学、防渗特性与各种组合材料之间的关系,以及复合程度对整体特性的影响.从本质上分析了复合膜的作用机理和破坏机理.在此基础上,提出了复合膜的变形率与防渗性能的关系,对复合膜的设计准则提出了新的见解.进行了复合膜现场施工电测法无损检测技术的理论分析研究和模拟试验验证,解决了可行性问题,这一方法在国内外均未见有报道.通过一系列的试验,得到了土工织物淤堵判断准则、土工膜透水性指标的选取、土工膜穿刺压力范围、被保护土或垫层土级配影响等许多有意义的成果.

2.2.2 废料柔性混凝土的研究与应用

鉴于二期围堰的复杂性,如何选用防渗墙材料是一个首要问题.水利工程中常用的防渗墙材料是普通混凝土,混凝土防渗墙在我国水电建设中的应用有近百例,且有一定的工程经验及设计规范.但是,在工程实践中发现,普通混凝土防渗墙存在不少缺陷:①弹性模量高,允许变形小,应力集中于墙体,易产生裂缝;②墙体与周围土体相对沉降大;③原材料耗费大,工程造价高;④围堰施工程序复杂,特别是在拆除阶段需采用爆破技术,对主体建筑有影响.由于二期围堰的填料性质很差,普通的混凝土不能适应堰体可能发生的较大变形,且施工难度大,造价高.用什么材料建造防渗墙是问题的关键,作为一个运行期较长的临时建筑物,采用易建、易拆、有一定寿命、能适应较大变形的新材料当为首要选择.

近年来新发展的塑性混凝土防渗墙是解决这个问题的新思路.塑性混凝土具有一定的强度和较小的弹性模量,以及较大的极限拉应变,从而使墙体变形能适应堰体的大变形;与普通混凝土相比,塑性混凝土能节省大量的水泥,因而大大降低工程造价;塑性混凝土中含有膨润土和粘土,具有良好的抗渗性能 and 和易性.但是以往的塑性混凝土防渗墙仅用于中低土石坝,并且其配方及力学指标均不能满足二期围堰的设计要求,因此研究适合于二期围堰的高强度、低弹模的塑性混凝土材料是必须攻克的难关.如果仍按传统的塑性混凝土进行研究,由于在三峡坝区天然河砂料源不足,且塑性混凝土配比成分多,给施工造成不便,又要增加工程费用,因此研制就地取材、性能与塑性混凝土类似的防渗材料,成为研究

的焦点。

三峡坝区有工程开挖出的大量风化砂和生产混凝土人工骨料的石屑粉弃渣,这些废料若不加以利用,需寻求大片堆放场地,既占用耕地,又严重影响环境。如古树岭骨料加工场每年排放石屑弃渣约 150 万 m^3 ,预计排渣总量约 750 万 m^3 。石屑粉中不仅含泥而且云母含量较高,级配较差,不能直接用作建筑材料。风化砂的数量尤为巨大,它存在于花岗岩层表层,厚度可达 40 m。为避免这些废料被非法倾倒在长江或随处堆积,特利用风化砂及石屑粉弃渣研制出新型塑性防渗墙材料——废料柔性混凝土^[3]。这种材料具有高强低弹特性,抗渗性好,易于浇筑施工,且易于拆除。它的强度为常规混凝土的 1/5 左右,而弹模仅是常规混凝土的 1/20 ~ 1/30,能够适应较大变形而不破坏,非常适用于围堰防渗墙体。它与传统的塑性混凝土相比,由于利用了废料更为节省投资,且有利于环境保护。

在柔性混凝土的优化配方研制过程中,采用了先进的试验设计理论——均匀设计法进行了初选试验设计,使 3 因素 10 水平的试验仅需要进行 10 组配比试验即可达到全面试验的效果,比用其它试验设计方法大大减少了试验量,因而节省工作时间,提高了研究工作的效率和水平。采用人工神经网络技术建立了柔性混凝土的配合比图谱,可以任意选定原材料的配方。此研究成果在现场应用十分成功,达到施工方便、造价低廉、质量满足要求,其模强比达到 200 ~ 250 范围内,在国际上都是很先进的,本项研究成果具有重要的实用价值和一定的理论意义。

2.3 防渗墙成墙技术的创新

二期围堰的主要技术关键在于防渗墙施工。防渗墙工程量巨大,施工强度极高,难度很大,沿线地层地形条件不利,而传统的冲击钻施工工艺落后、工效较低。为此,针对不同地层特征,研究采用了不同的成槽方法和机具(多系在三峡工程中首次应用),极大地提高了成槽速度,攻克了难关。主要的方法有:

a. 铣削成槽法。采用从德国进口的液压双轮铣,对堰体、覆盖层和全强风化层铣削成槽,速度快、效率高。

b. 铣、砸、爆结合成槽法。在铣削成槽中,遇大块石、块球体和硬岩时,即用 SM-400 型全液压钻机钻孔爆破或辅以槽内紧密聚能爆破,对块球体密集带则经钻孔预爆后再以重锤冲砸,击碎后再用液压铣清孔,有效地解决大块石问题。

c. 两钻一抓(铣)成槽法,先用冲击钻或冲击反循环钻机钻主孔,终孔后用抓斗抓副孔(或用液压铣铣副孔)。该法造孔精度高,效果好。遇块球体和硬岩

时,仍用冲击钻砸碎成槽。

d. 两钻三抓(铣)成槽法。先用冲击钻或冲击反循环钻机完成槽孔两端头孔,中间部位用抓斗(液压铣)三抓(铣)完成。先抓(铣)中部,再抓(铣)两边。

e. 上抓(铣)下钻成槽法。在槽孔上、中部用抓斗(液压铣)三抓(铣)成槽,下部有块体和硬岩时用冲击钻或冲击反循环钻砸碎成槽。本法工效很高,但造孔精度不及以上 c、d 两法。

在采用上述各法造孔时,还遇到许多难题,都经过深入研究采用适当措施攻克了难关。例如平抛垫底层、一期围堰坡脚及预进占裹头段石渣架空严重,危及槽孔及施工设备安全。为此采取投入堵漏料(粘土、风化沙、小石,必要时投入水泥、膨润土等)后用钻头冲击实(一般平打深度为 1 m),然后抓取 1 ~ 2 m,再投再抓,分层施工完成,并用优质膨润土泥浆(如 CMC 和 APAM 等)固壁,防止坍塌。另一措施是根据先导孔资料,掌握严重架空部位,布设灌浆孔自下而上分段预灌浓浆。灌浆材料为掺入水玻璃、膨胀粉、膨润土等的水泥膨润土砂浆。

在钻进过程中,钻头磨损极快,为此研究采用了高强度耐磨底刃,可显著降低补焊钻头的劳动强度,提高钻进速度。成槽施工中,在槽内掉入钻具或其它铁件难以避免。以往的处理方法很复杂、低效,为此研究了深水电磁铁打捞技术。制造的电磁铁为直径 590 mm 的圆柱体,重 250 kg,密封性达 10 MPa。配高级电缆及漏电保护装置,应用效果良好。

上述各种成槽技术的应用,使成槽速度提高到新的水平(如下游防渗墙的成墙速度达 6 600 $\text{m}^2/\text{月}$),而且攻克了架空层成槽、块球体的爆砸辅助成槽、钻头磨损、铁件打捞等难关,大规模冲击反循环成槽和 APAM 固壁泥浆等都达到国内领先水平。这些科技成就和突破,使二期围堰近 10 万 m^2 的防渗体得以按期高质量地完成。

2.4 数值模拟的研究与应用

混凝土防渗墙土石坝在国内已有许多实例,在施工方法上已有丰富经验,但在设计理论和计算方法上并不成熟,有些问题的认识不很清楚,尤其对坝体防渗墙更是如此。在设计阶段,围堰的结构型式是中心环节之一,而堰体和墙体的应力应变分析是判断其安全性的重要内容。通过数值计算一方面可搞清堰体和墙体的应力应变分布规律,为设计提供依据;另一方面根据计算结果可以进一步完善设计。三峡围堰工程的许多优化设计都是在数值模拟的基础上进行的。在运行阶段,同样可以根据竣工断面、实际参数、实际的受荷以及可能的危险状况,用数值分析的方法计算墙体的应力变形规律,结合墙体的破

坏判别准则评价其安全性.20世纪80年代中期,国内就有多家单位参与这项研究,采用的数学模型多达8种,采用了非线性弹性模型和弹塑性模型,包括:Duncan-Chang E- μ 模型、Duncan-Chang E-B模型、B-G模型、清华模型、河海模型、南水模型、样条函数模型等.各种模型的计算结果比较表明,Duncan-Chang E- μ 模型与其它弹塑性模型相比,计算结果基本一致,仅其变位稍偏大,但是其应力变形符合一般大坝围堰的应力变形特点.虽然从理论上讲,弹塑性模型更能反映松软土体的剪缩特性.但是,数值计算的精度不仅取决于模型的选择,更重要的是如何正确选择和易于获得计算参数,同时还与计算技巧、计算经验等多方面因素有关.Duncan-Chang E- μ 模型在工程分析中应用最多,计算经验最丰富,而且计算参数易于从常规三轴试验中获得,即便是有的材料无法从试验中获得,也可以从其它类似工程中类比得到,在二期围堰的计算分析及安全性评估时皆是采用Duncan-Chang E- μ 模型计算^[4].

数值模拟方法,对防渗墙的结构优化起到了重要作用.根据数值计算,确定了墙体材料参数,当28d的抗压强度 $R_{28}=4\text{ MPa}$ 和初始模量 $E<1000\text{ MPa}$ 时,墙内的应力水平基本上可以在允许范围内,应力值较低,剪应变和拉应变也小于允许值,这种材料的“模强比”在250以内,即为柔性混凝土.根据柔性材料进行多种方案的计算比较,最终确定二期横向围堰堰体均采用低混凝土防渗墙上接抗渗土工织物的防渗方案.进一步计算确定防渗墙的厚度为1.0m,在深槽段采用双墙.双墙的施工顺序,也是通过数值模拟确定为先打上游墙,后打下游墙.下游围堰深槽段防渗墙的方案优化,数值模拟也起到了决策性的作用,经过计算,将原来1m厚的墙体和一道高压旋喷墙,改为增加墙厚为1.1m,代替高压旋喷墙,这样大大减小了施工难度,这个优化方案被采纳并得到实施.

数值计算所得结论对二期围堰的断面优化和防渗墙的结构优化起到了指导性的作用.不论是数学模型、计算方法、技巧、参数、设计方案和工况的确定都经过认真的考虑、比较和不断完善,因此计算条件比较真实,成果的精度较高,做到了“准确的定性,粗略的定量”^[4],为围堰的设计起了十分重要的作用.这也是在岩土工程中运用数值分析方法获得巨大成功的一个范例.

3 结 语

三峡工程二期围堰是影响整个工程建设成败的重大关键建筑,存在许多技术难点.正是因为采用了先进的新技术、新工艺、新材料、新机具并进行高水平的组织管理,采用了先进的试验技术离心模型试验,解决了深水抛添风化砂的密度问题,从而对围堰的断面结构进行了优化设计;发展和突破了防渗墙的成墙技术;开创了利用风化砂和石屑粉浇制柔性混凝土防渗墙的先例,并获得成功;利用数值模拟方法,对断面结构和防渗墙结构进行优化设计,确定了墙体材料参数、墙的厚度与高度、单墙、双墙、施工顺序等等.在施工过程中,各项科研工作始终没有停止,而且紧密结合设计和施工的新情况,不断地进行跟踪研究,为工程的决策和优化提供新的依据.

参考文献:

- [1] 潘家铮.对二期围堰建设的评价[J].中国三峡建设,1999(5):1~5.
- [2] 包承纲.三峡围堰建设中若干关键技术问题的解决[J].中国三峡建设,1999(5):32~36.
- [3] 张小平.柔性混凝土和岩土轻质材料的特性与工程应用的研究[D].南京:河海大学,2000.
- [4] 包承纲.三峡工程二期深水围堰的建设和研究[J].水利水电科技进步,2001,21(4):21~25.

(收稿日期:2002-01-28 编辑:傅伟群)

·简讯·

《水利水电工程勘察设计的新技术实用手册》已出版

由李国轩主编的《水利水电工程勘察设计的新技术实用手册》已由吉林摄影出版社出版.该书分为上、中、下三册,以水利水电工程勘察、设计、施工为主线,囊括了水利水电工程勘察、设计、施工各个重点环节和当今世界水利水电前沿的先进技术,集中反映当前国内外水利水电技术发展的新动态,列举了大量工程实例,具有可操作性强、可借鉴性强、权威性强等特点.本书邮购价768.00元(免收邮挂费).另有《水利工程建设与防汛抗旱实务全书》(全三卷),邮购价798.00元(免收邮挂费);《水利水电工程施工组织设计指南》(上、下册),邮购价102.00元.

邮购地址:北京55信箱 清平书店 金莉收.邮编:100053;电话:010-83154081.

户名:北京清平书店有限公司;开户行:招商银行展览路支行;账号:0981106810001.

(刘景阳供稿)