

截流围堰堤防 与施工通航

杨光煦 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

前 言

作者参加工作 30 余年来,有幸参加长江三峡、葛洲坝、汉江丹江口、赣江万安等水利枢纽,贵州乌江渡、重庆江口等水电站,深圳河治理、长江九江城防堤、武汉青山热电厂粉煤灰堤加固、武汉展览馆改建深基坑支护、深圳国际机场、珠海国际机场等著名工程建设,主持结构与施工设计,主要承担施工导流、水下及淤泥中施工技术及地基处理设计与研究工作。还参与了广东北江飞来峡、四川紫坪铺、湖南五强溪等水利枢纽、白云面板堆石坝、上海浦东国际机场、浙江瑞安海堤、珠海直升飞机场海堤加固、景德镇城防堤等工程设计咨询工作。

作者已发表的 5 本专著(其中 3 本评为优秀科技图书)及 90 余篇论文(其中 4 篇评为优秀论文)集中反映了从事上述工程设计与咨询工作中,解决一些关键技术问题的研究成果和实践经验。从中选择有关截流、围堰、堤防、深基坑及施工通航方面的论文共计 34 篇汇成本文集。

为精减篇幅,这次汇编时删去与本书主题关系不大的部分内容及各论文重复部分,从整体上构成一本内容较完整、有内在联系的《截流围堰堤防与施工通航》专著,有利于读者获得完整概念和借鉴参考。

为叙述系统性,本文集没有按照论文发表时间排序,而是按照导流综述、截流与堵口工程、围堰堤防及深基坑工程、围堰地基及其处理和施工通航五个方面排列相关论文,分述如下。

第一篇 导流综述

在天然河道中建造各种建筑物,特别是水利水电工程,必须对水流进行有计划的安排和控制,妥善地解决施工和水流综合利用的矛盾,根据水流的自然条件及工程建设需要进行施工导流,直接在流水中截流,建造围堰,创造永久建筑物干地施工条件。通航河道还应妥善解决施工通航措施。导流方式往往影响到枢纽建筑物布置和施工总布置,又是控制施工总进度的重要因素。截流、围堰与施工通航工程常需在水中直接施工,受自然条件影响大,施工技术较干地施工复杂,是一项技术难点多、涉及面广,又具特色的工程。因此,不论建设单位、施工单位,还是设计单位都极为重视施工导流方案。

本篇简述乌江渡、万安、葛洲坝及三峡等水利枢纽采用的施工导流程序、施工技术及建设经验。

葛洲坝及三峡水利枢纽的施工导流工程规模、技术难度都是首屈一指的。截流、围堰、土石方施工、混凝土施工、金属结构与机组安装都大量采用新技术、新设备。葛洲坝工程建成,标志着我国水利水电工程施工技术步入世界先进水平。三峡工程建设是我国水利水电事业的空前壮举,标志着我国水利水电建设已处于世界领先水平。

在万安水利枢纽工程施工中采用的加快建设速度的工程技术措施表明,采用的施工导

流方案应有利于控制工期的主体建筑物先行施工,应有利于均衡施工强度、简化施工布置、施工程序。在中低水头水电站中,利用围堰临时挡水发电是提前发挥工程效益的有效措施,利用适当拓宽的导流明渠满足施工通航要求是可行的。

作者在主持乌江渡水电站过水围堰设计中,采用水下爆破、水下清基、水下立模及水下浇筑混凝土等水下施工技术,首创带键槽钢围圈、钢栅抛石改流、人字梁底槛、托架式叠梁闸门等水下施工结构,直接在流水中建成高45m的溢流式混凝土拱围堰,为直接在流水中建造混凝土坝创造了成功经验,并成功运用于1998年九江长江堵口工程中。该成果获全国科学大会奖、国家科技进步一等奖(组成部分)。

第二篇 截流与堵口工程

堵截河道或过水通道,迫使水流改道流向预定通道的截流工程包括戗堤进占、龙口范围加固及其合龙。是人与大自然搏斗最壮观的一刻。截流成功,标志着工程施工进入一个新阶段。截流施工是一项紧张而繁重任务,需要周密计划、充分准备。在水深、流急、覆盖层深厚,需考虑通航和下游用水情况下,更为艰巨复杂。

堵口是属于抢险性质的特殊截流工程。堤防决口部位难以预测,往往陆路交通断绝,堵口物质匮乏,难以采用大型机械化施工。因此,在急流中堵口比河道截流更为艰巨、困难。随着我国国民经济迅速发展,堤防溃决带来损失也更为巨大。及时快速堵口已成为迫在眉睫的研究课题。

本篇重点介绍作者在截流理论方面的研究成果;葛洲坝、万安、三峡工程立堵截流实况及其经验(在导流综述篇介绍了乌江渡水电站采用钢栅抛石改流及托架式叠梁闸门截流的经验)。

葛洲坝工程实测截流流量 $4720\sim 4190\text{m}^3/\text{s}$ 、截流水头差3.23m,居世界立堵截流第3位。该项目获国家建委优秀设计金奖。

1997年11月8日长江三峡大江截流成功。实测截流流量 $11600\sim 8480\text{m}^3/\text{s}$,最大抛填强度 $19400\sim 17100\text{m}^3/\text{d}$,均居世界首位。获水利部优秀设计金质奖。

作者提出的截流理论指出,立堵截流有高流速型、深水低流速型及混合型三大类型,有完全不同的稳定机理,并对不同截流类型提出确保成功的技术措施。葛洲坝长江截流流量大、流速大,属高流速型,防止截流块体流失是实现截流成功的关键。三峡长江截流流量大,水深达60m,龙口流速却不大,属深水低流速型,后期进入混合型;确保进占堤头稳定,减少坍塌是实现安全截流的关键。

本篇有三篇论文,分析河堤决口水力特性、综述堵口技术及九江堵口实录。1998年8月7日九江市的长江城防堤在超历史最高洪水位情况下,突然溃决。作者担任抢险堵口指挥部技术组组长。堵口分截流、堵口、闭气三阶段,按沉船、钢管栅栏石截流、钢木构架组合堤堵口、石袋后戗台加固、抛土闭气五步实施。在2万余名解放军、武警战士奋力拼搏下,仅5天堵口成功。为我国截流与堵口技术发展,提供了极其宝贵的理论与实践经验。

第三篇 围堰堤防及深基坑工程

围堰是用于围护水工建筑物施工场地的临时挡水建筑物。围堰建成是水利水电工程战

胜自然的成功标志。围堰形式众多。土石围堰可以充分利用开挖废料，能大面积快速填筑，成本较低；当与土石坝体相结合时，更为经济，采用也最多。碾压混凝土围堰施工方便、快速，能安全溢流，已成为过水围堰的主要形式。

本篇主要介绍土石围堰、堤防、粉煤灰堤坝及深基坑支护的合理结构、渗流控制措施及填料设计、施工方法。

万安水电站土石围堰实施经验表明，土石围堰具有不同于一般土石坝的施工和运行特点。其合理的结构应是断面简单、便于施工和拆除，满足稳定、防冲和防渗要求。《万安水电站土石围堰的结构和填料设计及地基防渗措施》评为省部级优秀论文。

堤防是城镇防洪的安全屏障。堤身及挡水水头一般不高，挡水时间较短，往往为分期加高加固，造成堤身填料及结构复杂。其防渗及渗流控制有不同于土坝、围堰的特殊要求，应以渗径及逸出坡降控制为主，优先采用“导压兼施，以导为主”方案，充分注意防止不同结合面产生接触冲刷。

采用粉煤灰填筑地基及堤坝，是一项减少污染、有利于环境、值得推广利用的一项新技术。但粉煤灰抗渗能力极差，为确保粉煤灰堤坝及地基渗流稳定性，应防排结合，做好反滤，尽可能降低坝身浸润线和被水饱和区。

深基坑支护是确保地面以下建筑物安全施工的一种特殊围堰形式，也是岩土工程界最富挑战性和风险性工程。武汉地区Ⅰ级阶地有明显二元结构。深基坑底流线几乎是向上的铅直线，土层内的水力坡降下小上大，理论分析和实践经验均表明，防治承压水的最佳方案是悬挂式隔渗帷幕与降水管井组合方案。在淤泥地基中进行基坑开挖难度大，作者首次提出挤淤理论及压淤平台、着底式挤淤置换地基、封闭式拦淤堤等新型挡淤支护结构，在深圳国际机场深厚淤泥地基处理工程中得到成功应用。获得国家科委重大科技成果证书，论文被评为省部级优秀论文。

围堰填料选择及其填筑方法直接关系到结构安全、工程成本与工期。采用级配较理想的砾质土或宽级配土防渗，不仅不会恶化围堰防渗性，且形成的填筑体变形小，有较高的抗剪强度，便于高强度填筑。当采用风化料作为防渗填料时，应采用压实后的级配及其力学参数作为设计依据。级配曲线平缓、凹向上方的风化料渗透系数小，产生裂缝后的自愈能力强，宜优先选用。在围堰及堤防填筑施工中，可采用夯击法填筑破碎过大块体、改善填料级配、压实填料、消除粉细砂液化、挤出或逸散淤泥。

三峡二期围堰须在60m深水中填筑。作者系统分析粘性土、风化砂及块石深水抛投及施工期边坡稳定的一般规律后指出最合理的深水填筑方法：块石及石渣宜采用自卸汽车沿填筑体进占前沿全线均匀、薄层抛投进占，力求形成较平整坡面；粘性土宜采用推土机一次大量、快速推入水中填筑；砂砾及风化砂应避免集中一处，采用汽车均匀卸料在堤头上，由推土机推入水中，均匀挺进。《深水抛投法填筑研究》评为海洋学会优秀论文。

第四篇 围堰地基及其处理

围堰大多建在砂砾地基上，通过地基处理，使其满足防渗及渗流稳定要求。截水槽、防渗墙、铺盖是较好的围堰砂砾地基防渗形式。围堰岩石地基多采用开挖及灌浆方法处理，以满足地基轮廓、稳定及防渗要求。淤泥及淤泥质软土地基主要是减少变形与沉降处理，使

其满足承载力及不均匀沉降要求。位于地震区或邻近施工爆破频繁区的粉细砂地基还应进行防止振动液化处理和复核。围堰地基往往承受水流冲刷，多采用抛石戗堤进行防冲保护。

本篇重点介绍作者从事砂砾地基防渗工程设计与施工中的研究成果、经验。包括粉细砂特性及工程处理措施、钢板桩防渗帷幕设计与施工、板桩灌注墙及处理粉煤灰地基的成墙板桩和特殊施工技术、防渗墙控制指标分析、水下抛土铺盖及淤泥铺盖的设计计算方法。

作者提出采用盖重、围封及截断渗流方式处理三峡一期土石围堰深厚粉细砂地基，节约了大量水下开挖及填筑量，获1997年湖北省优秀工程设计一等奖。板桩灌注墙处理粉煤灰地基获国家专利。

黄河禹门口提水工程的混凝土围堰位于水下倒悬岩体上，严重危及工程安全。作者运用新奥法理论，采用内承式预加固、预支护措施，顶部设置加强拱、灌浆加固、锚杆支护、拱形开挖及控制爆破措施，避免了水下施工，缩短了工期，降低了成本。

深圳机场位于深厚淤泥层上，采用作者提出的拦淤堤封闭式换填地基。挖出的大量淤泥采用加快扰动淤泥失水措施、湿地作业技术及局部加强方法等土面浅层处理措施，成功地利用全部挖出淤泥填筑飞行区及海堤，不仅降低工程成本，且解决了淤泥堆存的困难。

第五篇 施工通航

至今尚未见系统介绍施工通航设计计算及其工程技术措施的有关论著。本篇根据作者参加三峡、飞来峡、万安等水利枢纽施工通航咨询、设计和研究成果，提出施工通航水力学计算方法及其工程技术措施。不规则的导流明渠断面会恶化流态，有施工通航要求的导流明渠宜采用纵向平顺、横向复式断面形式；纵向围堰头部、尾部宜分别采用椭圆曲线、圆弧曲线，做好护坡护岸，设置必要的整治工程。

万安水利枢纽为低水头水电站，永久通航建筑物为单级船闸，按施工通航要求适当加以改进、改造，即可直接用于明渠封堵后的施工期通航。三峡工程采用五级连续船闸，无法用于施工期通航；另行设置单级临时船闸，配合导流明渠满足施工通航要求。

本文集出版得到中国水利水电出版社、长江水利委员会长江勘测规划设计研究院领导，以及李念宣高级工程师等同志的热情关心与支持。黄会明编辑认真审稿，提出许多宝贵意见，付出了艰辛劳动，使本文集能在较短时间内与读者见面。在此向他们表示谢意。

杨光煦

1999年7月25日

目 录

前 言

第一篇 导流综述	1
1.1 葛洲坝、三峡工程建设与现代施工技术	3
1.2 加快万安水电站建设速度的工程技术措施	11
1.3 万安水电站施工导流特点与经验	17
1.4 在流水中直接建造溢流式混凝土拱围堰	28
第二篇 截流与堵口工程	37
2.1 两次长江截流实践及截流理论新探讨	39
2.2 从葛洲坝、万安水电工程的截流实践谈立堵截流施工中的几个问题	50
2.3 三峡大江深水截流工程设计原则探讨	65
2.4 三峡工程大江截流实况及其分析	72
2.5 河堤决口水力特性及堵口技术	77
2.6 九江长江江堤堵口实录及经验	88
2.7 堵口技术新发展——九江堵口工程中的创新技术	95
第三篇 围堰堤防及深基坑工程	99
3.1 万安水电站土石围堰的结构和填料设计及地基防渗措施	101
3.2 长江江堤及九江溃口段复堤渗流控制与地基处理设计	108
3.3 堤防险情及其处置	117
3.4 深基坑隔渗帷幕设计与计算	124
3.5 淤泥地基基坑开挖中的新型挡土支护方法	133
3.6 砾质土的防渗性能及其设计	143
3.7 风化石及其配合土在防渗工程中的应用	153
3.8 夯击法填筑	162
3.9 水中端进抛投填筑	172
3.10 三峡二期围堰深水抛投风化石施工期稳定分析及抛投技术	183
3.11 粉煤灰坝及其地基的渗流控制	190
第四篇 围堰地基及其处理	201
4.1 粉细砂特性及其工程措施	203
4.2 三峡一期土石围堰深厚粉细砂地基的防护结构与施工措施	220

4.3	万安水电站低水土石围堰钢板桩防渗帷幕设计与施工	227
4.4	粉煤灰堤及地基的板桩灌注墙防参与补强	234
4.5	三峡工程二期围堰防渗墙控制指标分析	240
4.6	水下抛土铺盖在围堰砂砾地基防渗中的应用	245
4.7	在透水地基上采用淤泥铺盖防渗方法	260
4.8	新奥法处理禹门口提水工程围堰水下倒悬岩体	267
4.9	淤泥地基的土面浅层处理	274
第五篇 施工通航		285
5.1	导流明渠施工通航水力学计算与设计	287
5.2	万安水利枢纽施工期临时通航设计	299
5.3	万安水电站一期导流期间的施工通航措施	305
参考文献.....		311

1.1 葛洲坝、三峡工程建设与现代施工技术

葛洲坝水利枢纽工程（图 1.1.1）是我国已建成的最大水利水电工程（表 1.1.1），装机容量 271.5 万 kW，分两期施工。第一期围左岸二、三江，建造二江泄水闸、二江电站、三江的 2 号及 3 号船闸、冲沙闸，利用大江通航和宣泄施工流量。第二期大江截流，围主河床，建造大江电站、大江冲沙闸及 1 号船闸。利用二江已建的 27 孔泄水闸宣泄施工流量，利用 2 号、3 号船闸及三江航道通航。1974 年 10 月 20 日开始浇二江主体工程混凝土，1981 年 1 月 4 日大江截流成功，同年 7 月二江第一台 17 万 kW 机组并网发电，12 月 18 日大江基坑开始浇混凝土。1986 年 5 月 31 日大江第一台 12.5 万 kW 机组发电。1988 年完建。1991 年 11 月 27 日通过国家竣工验收。

三峡水利枢纽（图 1.1.2）是世界上最大的水利水电工程，装机容量 1820 万 kW。分三期施工。第一期围右岸，开挖导流明渠，建造混凝土纵向围堰及三期碾压混凝土围堰基础部分。利用主河床通航和宣泄施工流量。位于左岸山间的永久船闸、临时船闸同时开始施工。第二期围主河床，建造泄洪坝段、左岸厂房坝段及电站厂房（14 台 70 万 kW 机组）。江水由导流明渠宣泄，船只由导流明渠及临时船闸通过。第三期围右河床，抢筑三期上流碾压混凝土围堰，以后靠其与下游土石围堰全

年挡水，建造右岸厂房坝段及电站厂房（12 台 70 万 kW 机组）。江水由主河床内已建的 22 个 6m×9m（▽56.5m）导流底孔宣泄，船只由临时及永久船闸、升船机通过。

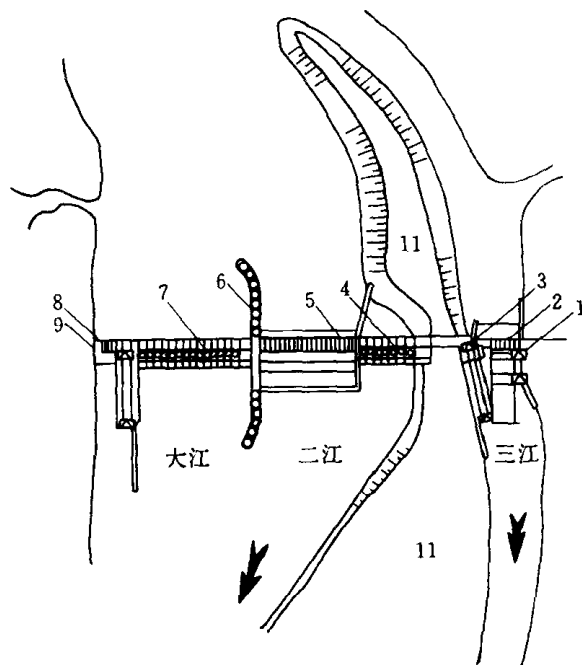


图 1.1.1 葛洲坝水利枢纽平面布置图

1—三江 3 号船闸；2—三江冲沙闸；3—三江 2 号船闸；
4—二江电站厂房；5—二江泄水闸（27 孔）；6—钢板
桩围堰；7—大江电站厂房；8—大江 1 号船闸；
9—大江冲沙闸；10—防淤堤；11—西坝

表 1.1.1

葛洲坝和三峡水利枢纽工程量及施工强度

项 目		土石方开挖 (万 m ³)	土石方填筑 (万 m ³)	混凝土 (万 m ³)	金属结构安装 (万 t)	钢筋 (万 t)
主体建筑物工程量	葛洲坝	5799	3088	1042	7.29	17.7
	三 峡	10259	4149.2	2714.6	28.08	32.7

1.1 葛洲坝、三峡工程建设与现代施工技术

葛洲坝水利枢纽工程（图 1.1.1）是我国已建成的最大水利水电工程（表 1.1.1），装机容量 271.5 万 kW，分两期施工。第一期围左岸二、三江，建造二江泄水闸、二江电站、三江的 2 号及 3 号船闸、冲沙闸，利用大江通航和宣泄施工流量。第二期大江截流，围主河床，建造大江电站、大江冲沙闸及 1 号船闸。利用二江已建的 27 孔泄水闸宣泄施工流量，利用 2 号、3 号船闸及三江航道通航。1974 年 10 月 20 日开始浇二江主体工程混凝土，1981 年 1 月 4 日大江截流成功，同年 7 月二江第一台 17 万 kW 机组并网发电，12 月 18 日大江基坑开始浇混凝土。1986 年 5 月 31 日大江第一台 12.5 万 kW 机组发电。1988 年完建。1991 年 11 月 27 日通过国家竣工验收。

三峡水利枢纽（图 1.1.2）是世界上最大的水利水电工程，装机容量 1820 万 kW。分三期施工。第一期围右岸，开挖导流明渠，建造混凝土纵向围堰及三期碾压混凝土围堰基础部分。利用主河床通航和宣泄施工流量。位于左岸山间的永久船闸、临时船闸同时开始施工。第二期围主河床，建造泄洪坝段、左岸厂房坝段及电站厂房（14 台 70 万 kW 机组）。江水由导流明渠宣泄，船只由导流明渠及临时船闸通过。第三期围右河床，抢筑三期上流碾压混凝土围堰，以后靠其与下游土石围堰全

年挡水，建造右岸厂房坝段及电站厂房（12 台 70 万 kW 机组）。江水由主河床内已建的 22 个 6m×9m（▽56.5m）导流底孔宣泄，船只由临时及永久船闸、升船机通过。

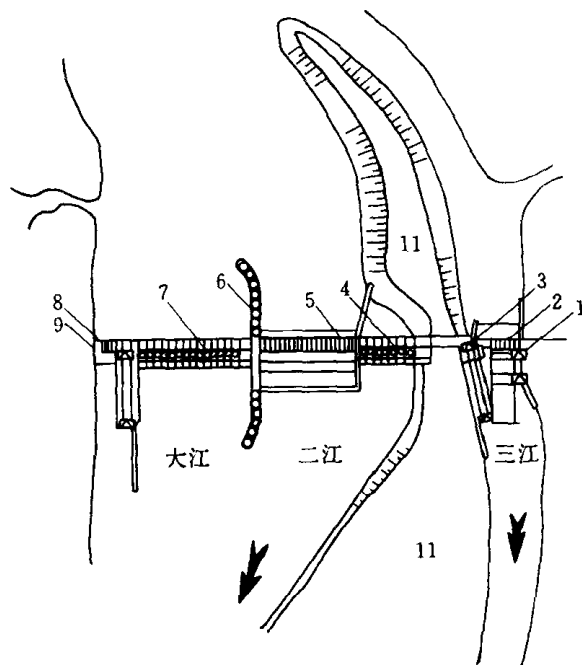


图 1.1.1 葛洲坝水利枢纽平面布置图

1—三江 3 号船闸；2—三江冲沙闸；3—三江 2 号船闸；
4—二江电站厂房；5—二江泄水闸（27 孔）；6—钢板
桩围堰；7—大江电站厂房；8—大江 1 号船闸；
9—大江冲沙闸；10—防淤堤；11—西坝

表 1.1.1

葛洲坝和三峡水利枢纽工程量及施工强度

项 目		土石方开挖 (万 m ³)	土石方填筑 (万 m ³)	混凝土 (万 m ³)	金属结构安装 (万 t)	钢筋 (万 t)
主体建筑物工程量	葛洲坝	5799	3088	1042	7.29	17.7
	三 峡	10259	4149.2	2714.6	28.08	32.7

续表

项 目		土石方开挖 (万 m ³)	土石方填筑 (万 m ³)	混凝土 (万 m ³)	金属结构安装 (万 t)	钢筋 (万 t)
年最大施工强度	葛洲坝	1259	274	202.9	2.22	
	三 峡	2251	787	410.9	4.6	
月最大施工强度	葛洲坝	226	116	24.5		
	三 峡	268	300	46.0		

注 葛洲坝工程均为实际值，三峡工程均为设计值。

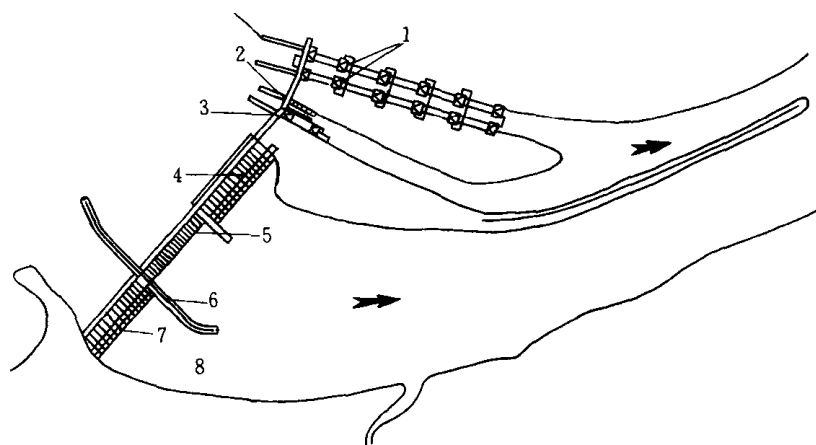


图 1.1.2 三峡水利枢纽平面布置图

1—永久船闸；2—升船机；3—临时船闸；4—左厂房（14台）坝段；

5—泄洪坝段；6—混凝土纵向围堰；7—右厂房坝段；8—导流明渠

1992年11月12日，葛洲坝水利水电工程集团公司首批千余名职工开进三峡坝区，开始施工准备工程。一期土石围堰于1993年10月24日开始下河填筑，1994年7月6日完工。同年12月6日开始浇筑混凝土纵向围堰，比原计划提前10个月。位于左岸岸坡以上的临时及永久船闸，厂房1~6号机组坝段同时进行大规模土石开挖工程。1996年10月完成导流明渠堰内段开挖，开始拆除一期围堰。1997年10月6日开始明渠通航。11月8日长江截流成功，开始二期工程建设。一期施工中完成的主体建筑物工程量：土石方开挖9265万m³、土石方填筑2215万m³、混凝土浇筑348万m³。

在葛洲坝及三峡工程的施工组织设计及施工中，大量开拓和采用现代施工技术成果达数百项。葛洲坝工程建成，标志着我国水利水电施工技术发展步入世界先进水平。三峡工程建设是我国水利水电事业的空前壮举，标志我国水利水电工程施工技术处于世界领先水平。

一、大江大河导截流工程

1. 截流

葛洲坝工程于1981年1月3日正式开始大江立堵截流，次日合龙。实测截流流量4720~4190m³/s，仅次于三峡、伊泰普水电站截流规模；截流最大落差3.23m，历时36h23min。

三峡工程二期长江截流设计流量为11月中、下旬5%最大日平均流量19400~14000m³/s，居世界首位。由于龙口水深达42~60m，龙口抛投量大、抛投强度大，截流落

差却不大(表 1.1.2),着重研究解决深水高强度抛投施工技术及堤头稳定措施,已于 1997 年 11 月 8 日截流成功。三期明渠截流设计流量为 12 月上旬 5%最大日平均流量 $9010\text{m}^3/\text{s}$,截流落差 3.5m,最大单宽能量达 $3.14 \times 10^6 \text{Nm}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

2. 围堰

葛洲坝二期纵向围堰挡水后需要拆除,在我国首次采用格型钢板桩围堰。由日产一字型钢板桩构成直径达 19.87m、高 19.5m 的圆筒 31 个,圆筒间用半径 5.1m 的连弧段钢板桩连接,共用钢板桩 7151t,筒内回填砂砾石 22.57万 m^3 。拆除后的钢板桩,1988 年又转用于龚嘴水电站消力塘整治工程的钢板桩围堰。

葛洲坝大江上游围堰最大堰高 49m,填筑量 282.6万 m^3 ,采用两排共计 4.18万 m^2 混凝土防渗墙作为堰体及砂砾地基防渗体。月最大土石填筑强度 105.6万 m^3 ,日最大填筑强度 11.0万 m^3 ,防渗墙造孔月最大进尺 12245m,日最大进尺 558m(墙厚 0.8m)。

葛洲坝大江下游围堰填料,主要是水下抛投的含泥量为 30%~50%的砂卵石与粘土岩石渣组成的混合料。第一年汛后迎水侧坡脚淤积泥砂层厚 2~8m,第二年汛后增为 5~10m,最厚达 16m,直接依靠混合料及淤积泥砂防渗。

三峡一期土石围堰地基上淤积有 4~8m 厚的粉细砂,若全部挖去,工期不允许。采用围封、盖重及防渗墙截渗措施,迎水侧采用水下抛投形成块石防冲堤。经 1994~1996 年汛期考验,渗水量很小,取得了在深厚粉细砂地基上直接建造围堰、土石坝的宝贵经验。

三峡二期上游围堰高达 82.5m,填筑量达 691.9万 m^3 ,最大施工水深 60m,主要利用石渣及花岗岩风化砂作为填料。堰体水下部分及其砂砾地基深槽部位采用两道塑性混凝土防渗墙防渗,槽孔两侧各 2m 范围采用 75kW 及 150kW 振冲器振冲加密。堰体水上部分采用复合土工膜防渗。二期下游围堰高 68.5m,填筑量 549.6万 m^3 ,上、下游围堰均要求在一个枯水期内完成,月最大填筑强度达 282万 m^3 (其中上游围堰 $146.6 \text{万 m}^3/\text{日}$),为世界围堰工程首位。伊泰普上游围堰高 80m、下游围堰高 75m,填筑量分别为 577.6万 m^3 及 383.5万 m^3 ,两年建成,月最大填筑强度 200万 m^3 。在土石坝填筑中,仅次于塔贝拉坝(月最大填筑强度 450万 m^3)。我国密云土坝曾达 $276 \text{万 m}^3/\text{月}$ 。

二、土石方工程

葛洲坝及三峡工程土石方施工不仅工程量大,施工强度高,开挖面质量要求高,必须做好挖填平衡,且既有干地又有水下开挖,贯穿整个施工过程,施工干扰大;施工难度也是水利水电工程中所罕见的。

1. 爆破技术

葛洲坝工程地基岩性软弱,夹层多,岩层倾角平缓,开挖爆破对边坡及基础保护措施要求严。为此,在严格限制最大一段起爆药量前提下,采用梯段多排毫秒爆破。后来采用塑料导爆管,使分段不受限制。

1973 年首次在葛洲坝工程中采用预裂爆破技术,在粘土岩和粘土质粉砂岩中,最大预裂深度,一期工程为 26m,二期工程达 38m,砾岩中达 21m。一次预裂最大面积 6800m^2 。共完成预裂壁面 25万 m^2 ,节约投资 2500 万元。

葛洲坝大江上游围堰两道混凝土防渗墙,要求爆破拆除长度 712m,拆除深度 23m,墙体混凝土量 2.4 万 m^3 ,爆破后块体尺寸不大于 300mm。一次爆破总装药量 47.79t,装药孔数 3548 个。采用耦合间断的装药结构 324 段,双复式交叉串联非电起爆网路爆破技术。在距永久建筑物不到 200m 条件下,1986 年 1 月 17 日一次爆破成功。

三峡工程爆破开挖深度大、石方爆破工程量大,且在强度高的花岗岩层中爆破。主要采用深孔梯段爆破,以提高爆破率、改善爆碎块度,选用爆破孔径 100~110mm、药包直径 80~90mm;梯段高度 10m,不超过 15m;孔距 3.0~5.5m 之间,最小抵抗线 2.5~4.5m。为了保护建基面的完整性和高边坡稳定性,必须降低爆破振动强度,为此采用多段孔间微差爆破技术。临近开挖边线时,辅以预裂、光面、缓冲爆破等控制爆破技术。沿设计开挖轮廓面布置预裂孔,采用不耦合药包进行预裂爆破,形成预裂缝防震。光面爆破的爆破孔前方有自由面,其线装药密度较预裂爆破小,用于岩体较破碎不易形成预裂缝,或岩体坚硬形成预裂缝较窄部位。由于光面爆破消减松动爆破振动影响效果较差,必须采用多段微差爆破技术,严格控制单段药量。在光面爆破及预裂爆破孔前的 2~3 排深孔爆破采用缓冲爆破,进一步消减爆破振动强度。

为确保三峡主体工程底部基面及其下卧岩体的天然结构不因爆破振动影响而被破坏,长江水利委员会先后在葛洲坝、万安、隔河岩等工程进行了 10 余年的保护层一次爆破的试验研究工作。表明只要对保护层创造临空面,采用宽孔距、小抵抗线、小药卷的梯段毫秒爆破,孔底设置柔性垫层;或采用水平预裂的爆破技术(须先掏先锋槽),可以一次爆除保护层。与常规的“层层剥皮”方式爆破保护层相比,工期可缩短一半,单价降低一倍左右。

2. 土石方开挖

葛洲坝工程土石方开挖量 5799 万 m^3 ,其中岩石开挖 900 万 m^3 ,最大开挖深度 54m,主要采用 4 m^3 电铲及 6.9 m^3 装载机装料,20、32t 及 45t 自卸汽车出渣。三峡工程土石方开挖量 10259 万 m^3 ,其中岩石开挖 4208.8 万 m^3 ,最大开挖深度 176.5m,主要采用全液压、高风压钻孔设备及乳化混装药罐车进行钻爆作业,8~10 m^3 挖掘机装料,32、45t 及 77t 自卸汽车出渣。

(1) 凿裂法开挖:工艺简单、施工安全、有效工作时间长。用于开挖三峡工程的全风化及强风化花岗岩。采用带有高温不软化裂土器的大功率(250kW 以上)拖拉机将岩体翻松成碎块,用推土机集料;也可用斗容不小于 6 m^3 全液压挖掘机直接开挖。

(2) 高边坡开挖:三峡永久船闸边坡开挖高度一般在 120m 以下,最高达 176.5m;其中直立墙开挖最高达 60m。要求在施工期不能局部失稳、掉块和产生较大位移。首先要合理安排开挖程序:洞挖应先于明挖工程进行,每个梯段的开挖与加固工程基本同步结束,再转入下一梯段开挖,以利应力释放和边坡稳定。在边坡开挖后的减缓变形阶段及时采用锚杆(挂网锚杆、系统锚杆)、预应力锚束或喷混凝土支护。在边坡施工中采用摄像计算机快速编录成图新技术,及时反映开挖边坡的地质信息,以指导喷锚支护快速施工。形成的上部坡面尽可能采用 Netlon 网及三维植被网快速绿化。

(3) 水下开挖:葛洲坝工程大江航道水下开挖量 240 万 m^3 ,最大开挖水深 30m。15m 以内水深,采用 4 m^3 铲扬式挖石船开挖。水深超过 15m 时,采用 4 m^3 索铲上趸船开挖;并将 4 m^3 铲扬式挖石船改装成多功能的抓扬式挖石船,用斗容为 5 m^3 的六瓣抓斗进行深水开

挖。二期围堰体水下开挖量 26.7 万 m³，要求在 1986 年 4~5 月份完成，采用两艘 4m³ 铲扬式挖石船和 1 艘 750m³/h 链斗式采砂船，配 280m³ 泥驳出渣。

三峡工程水下开挖量达 1952.6 万 m³（包括淤泥淤沙清除量 756.4 万 m³）。淤泥淤沙采用绞吸式挖泥船清除。水深在 8m 以内的覆盖层，主要采用 8m³ 全液压反铲开挖；8m 以下，采用链斗式采砂船开挖，石驳运往弃渣场。水下岩石开挖水深一般在 9.5m 以内，采用水上钻爆船钻孔装药爆破，4m³ 铲扬式挖石船配 500~1000t 石驳出渣。深水部位采用 8m³ 抓斗清渣。

三、混凝土施工

三峡工程主体建筑物绝大部分属大体积混凝土，工程量及其施工强度均居世界首位（表 1.1.2）。葛洲坝工程的主体建筑物多属墩板梁柱、孔洞多，结构复杂，过流面积大，混凝土标号高，混凝土施工组织与管理亦十分复杂。

表 1.1.2 主体工程混凝土浇筑规模与强度比较表

工 程	三 峡	伊泰普	葛洲坝	大古力	古比雪夫	德沃夏克
混凝土总量（万 m ³ ）	2714.6	1315	1042	800	734	543
年最大浇筑强度（万 m ³ /年）	410.9	304	202.9	270	314	221
月最大浇筑强度（万 m ³ /月）	46.0	34.8	24.5	37.8	38.9	18.4
月平均浇筑强度（万 m ³ /月）	26.7	20.5	16.9	22.5		10.1
日最大浇筑强度（万 m ³ /天）	1.89	1.39	1.88		1.9	

葛洲坝工程天然砂石骨料年开采能力达 315~350 万 m³，配备 8 座混凝土拌和楼，月拌和混凝土总能力 35.5 万 m³。拌和楼出料以准轨火车运输为主（配 3m³ 及 6m³ 立罐），汽车运输为辅（配 3m³ 卧罐）。主要采用起重能力为 20t 的 MQ1260/60 型高架门机（外伸臂长 62m、起吊高度 60m）及 10t 门机、塔机浇筑混凝土。采用 50MPa 级冲毛机处理施工缝、柔性吸盘真空混凝土工艺、内锚式 300t 级预应力锚索、超声波和回弹仪无损伤检测等新技术。采用硅粉混凝土、苯乙烯—甲基丙烯酸甲酯浸渍混凝土提高闸孔混凝土的抗冲刷耐磨性能。

三峡主体及临建工程的混凝土总量达 2815.5 万 m³，共需骨料 4171.3 万 m³（其中砂 1142.8 万 m³）。设计砂石骨料年供应能力达 630 万 m³。右岸设置两个混凝土系统，4 座拌和楼；左岸为 4 个混凝土系统，8 座拌和楼。生产常规混凝土总能力 2160m³/h。拌和楼的出料以 6m³ 汽车式侧卸料罐车、无轨运输为主。主体建筑物混凝土浇筑采用 6 台塔带机为主，辅以 10 台高架门机和两台摆塔式缆机的综合施工方案。TC2400 型自升固定式塔带机，将塔机与宽 762mm 皮带机结合在一起，吊高 94m，浇筑混凝土最大幅度 100m，每台每小时浇筑能力 420m³。国产 MQ2000 型高架门机，吊高 100m，幅度 70m 时起吊能力 20t。两台摆塔式缆机控制承重索间距离不小于 10m，跨度 1416m，浇筑混凝土起吊能力 20t，塔架高 120m、摆幅±25m，吊钩扬程 120m。平仓振捣机的振捣深度为 0.75m、振动棒直径 150mm，生产能力 90~120m³/h。

1. 混凝土制备

葛洲坝工程采用日产 $750\text{m}^3/\text{h}$ 及国产 $250\text{m}^3/\text{h}$ 的大型采砂船挖掘河床砂卵石制备混凝土骨料。在我国首次实现夏季混凝土出机口温度 7°C ，采取的措施有：设置皮带机保温预冷廊道，向运往拌和楼的骨料喷洒 $3\sim 4^\circ\text{C}$ 冷水，在拌和楼冷却仓内通 $-14\sim -15^\circ\text{C}$ 冷风，每立方米混凝土加 50kg 片冰拌和。一期、二期工程制冷容量分别达 32.2 及 $71.2\text{GJ}/\text{h}$ 。

三峡工程系我国首次采用散装罐式 20 英尺标准集装箱（有效容积 $17.3\sim 18.5\text{m}^3$ ）运输水泥及粉煤灰，在长江上首次采用全直立钢管桩集装箱码头。二期工程采用的人工骨料加工系统生产能力 $3050\text{t}/\text{h}$ ，居世界首位（伊泰普人工骨料加工能力 $2160\text{t}/\text{h}$ ）。其中下岸溪为世界最大的人工制砂加工系统，设计生产能力 $780\text{t}/\text{h}$ ，采用适于中、细、超细碎的高效能 HP 系统改进型锥式破碎机和当代最先进的 Bar Maca 冲击式超细碎破碎机，可以严格控制人工砂质量的筛分—破碎闭路生产系统。古树岭人工碎石加工系统设计生产能力 $2540\text{m}^3/\text{h}$ ，选用中、细碎的 Omnicone 锥式破碎机，采用冲击挤压破碎及料间研磨，能有效地防止产生针片状骨料。左岸 98.7m 高程混凝土拌和系统选用两座自动化控制的日产 $2\times 4.5\text{m}^3$ 强制式拌和楼，每座生产能力 $324\text{m}^3/\text{h}$ 。在总结葛洲坝工程成功地制备 7°C 低温混凝土经验的基础上，进一步研究采用骨料二次风冷系统、砂冷却、肋片管蒸发器制冷水、负压式气力输送片冰、附壁式高效空气冷却器等新技术。采用我国最大的 $9\text{万 t}/\text{天}$ 级水上水厂船供水。制冷总容量 $167.5\text{GJ}/\text{h}$ 。

2. 模板

葛洲坝工程全面推广使用规格化、定型化钢模板。采用的组合式悬臂钢模板最大达 $6\sim 8\text{m}^2$ 。在二期工程中，钢模板使用面积 143.32万 m^2 ，占立模面积的 81% 。大江电站尾水管模板由实腹式整装木结构，改为分层空心式钢木结构，分层组装、立模，浇筑混凝土，每套尾水管木材耗量降到 78m^3 ，不到二江电站的 $1/4$ ，安装和拆除工效提高 1 倍以上。将常规浇筑二期混凝土形成闸门槽方式，改为采用预制混凝土闸门槽，简化了施工程序，提高了门槽质量。

三峡工程大量采用适用于大体积混凝土浇筑的仓内无拉条的全悬臂式整体大型钢模板：组合柱式悬臂钢模板及桁架式悬臂钢模板。升船机塔柱等墩柱、墙，采用滑升模板。钢模板使用比例在 85% 以上，周转次数 50 次。

3. 温度控制与施工分缝

葛洲坝工程的船闸和溢流坝段采用灌浆直缝或宽槽，柱状块浇筑，纵缝间距 $20\sim 36\text{m}$ 。电厂段以错缝为主，辅以宽槽和直缝。二江电厂进水口段与主机室段之间、蜗壳边墙以下采用宽槽；进水口段与主机室段及主机室段与尾水管段之间高程较高部位，采用直缝不灌浆，其余采用错缝。大江电厂将进水口段与主机室段底板间的宽槽改为灌浆直缝，不仅满足结构整体性要求，且便于施工，加快了进度。

为解决葛洲坝大型径流式电站的厚截面框架结构施工期温度应力，尾水管弯管段和排沙孔以设封闭块为主。尾水管扩散段在低温季节整浇，其他季节设封闭块。蜗壳顶板和胸墙采用严格温控措施整浇。

葛洲坝工程采用发热量低的大坝纯熟料 525 号及大坝矿渣 425 号水泥制备混凝土，掺用木质素磺酸钙等外加剂，减少水泥用量。夏季采用低温混凝土，薄层浇筑，加强气温骤

降时的仓面保温（聚氯乙烯泡沫塑料、草袋保温）。由于温度控制严格，二期工程已达到深层温度裂缝控制在 160 万 m^3 混凝土才发生一条的水平，避免了危害严重的基础贯穿裂缝。

三峡最大坝高 180m。泄洪坝段分三层布置有导流底孔、深孔和表孔；厂房坝段布置有直径 12.4m 的压力管道。结构复杂，运用要求高，对大坝温度控制提出了很高的要求。泄洪坝段顺流向最大长度 122.5m，设置两条纵缝，顺流向分块长度 25~52.8m，沿坝轴线横缝间距 21m。厂房坝段顺流向长 118m，宽 38.3m，纵缝间距 30m 左右。电站厂房采用错缝为主，结合直缝分块方案。大坝混凝土采用 425 号低热矿渣硅酸盐水泥和 525 号中热硅酸盐水泥制备。强约束区最高允许温度 32°C ，需采用浇筑层厚 1.5m、控制浇筑温度不高于 15°C 。为此，夏季混凝土出机口温度要求不高于 7°C ；层间间歇期控制为 7~9d，做到短间歇连续均匀上升。

4. 碾压混凝土施工

1984 年 12 月及 1985 年 10 月先后两次在葛洲坝 1 号船闸下导墙左侧护坦进行碾压混凝土施工试验。每立方米混凝土中水泥用量 52~66kg、粉煤灰 90~104kg。龄期 180 天时，现场取样实测平均容重 $2450\text{kg}/\text{m}^3$ 、平均抗压强度 23.4MPa ，层间接缝平均抗拉强度 1.1MPa 。

三峡工程三期碾压混凝土围堰高达 124m、底宽 109.6m，方量 168 万 m^3 。不设纵缝，仅设置横向诱导缝。设计月最大浇筑强度 39.1 万 m^3 ，日最大强度 1.89 万 m^3 ，日上升高度 0.7~1.2m，居世界首位（美国埃尔克溪坝及我国水口大坝、岩滩围堰的碾压混凝土最大日浇筑强度分别为 9470、12400 及 $8190\text{m}^3/\text{天}$ ）。主要采用三级配混凝土，控制水化热绝热温升在 12°C 以内。上游面采用二级配混凝土。垂直面采用定型悬臂钢模板，斜坡面修筑成台阶，采用小型组合钢模板。围堰下部用 32t 自卸汽车直接运料入仓；上部采用皮带机送料入仓，自卸汽车仓内转料，铺料机铺料，推土机平仓，10t 以上双辊自行式振动碾压实。

四、金属结构与机组安装

1. 闸门及启闭机安装

葛洲坝工程的金属结构及启闭设备安装总量达 7.29 万 t；单件重量大，主变压器运输重 110~180t，50 万伏联络变压器单件重 207t。创造了年金属结构安装 2.22 万 t 的记录，以及长达 190.2m 硬母线整体吊装就位施工技术的突破。1 号船闸下游人字门高 34.05t、宽 19.7m，单扇重 592t（承受上下游水位差 27m、门轴推力达 12950t），是世界上最大的闸门之一，分 11 节安装，仅用 10 个月安装完毕，调试成功。

2. 大型引水钢管安装

三峡电站引水钢管直径 12.4m，长 81m，直径仅小于塔贝拉水电站（直径 13m）。采用钢衬与钢筋混凝土联合受力设计、坝后浅槽背管布置方式。在预留的钢管安装凹槽上形成钢管安装支墩和轨道。利用厂坝 85m 高程平台上的 DBQ3000 型门机，从下而上顺序逐节安装。钢管安装一段长度后，绑扎钢筋，浇筑外包混凝土。钢管、钢筋安装和外包混凝土浇筑可以分作业面平行进行，有利缩短工期。外包混凝土为一次立模，分层浇筑，有利于质量控制。

3. 快速安装机组

葛洲坝工程安装水轮发电机组共 12 台。采用各种弯管、割管、焊管的成套设备、酸洗钝化新工艺、半自动氩弧焊接新工艺，提高施工效率；应用自制活塞卡环，使转轮缸体一次就位成功；自制转轮组装专用机架、电液调速器动态参数测试台、管路组装模拟平台等新设备，提高安装精度。水轮发电机组的上机架和导水机构采用一次组合吊装，工期由 50d 缩到 15d。1987 年内安装完 6 台 12.5 万 kW 机组，创造了装机的台数、装机容量及单机安装工期 33 天的三个全国第一。

三峡水轮发电机组的单机容量为 70kW，共 26 台（伊泰普水电站亦为 70 万 kW，18 台），外型尺寸大（转轮直径 9.85m）、推力轴承容量 5900t（伊泰普为 4400t）、单机重 7564t，均达到或超过世界现有水平。要求年投产 4 台，仅机组设备一年完成的安装量即达 3.2 万 t，位居世界榜首。

五、结 论

（1）为了适应日益艰巨的水利水电建设任务，我们必须抓紧世界新技术革命时机，充分认识邓小平同志指出的“科学技术是生产力，而且是第一生产力”的重要意义，积极创新并引进国内、外行之有效的先进施工新技术、设计新理论，并在施工实践中不断总结、提高。

（2）在葛洲坝工程建设中，采用大容量施工设备、实现配套的机械化施工，广泛采用新技术、新材料、新工艺和科学的施工管理，从而确保优质、高速地完成艰苦建设任务，获得国家科技进步特等奖、国家优质工程奖、优秀设计金质奖、全国最佳工程设计特等奖等数十项奖励。

（3）三峡工程自 1993 年开始进行全面施工准备工作以来，进展顺利。一期工程提前 10 个月浇筑混凝土；长江截流成功，主体工程按期进入二期工程全面施工新阶段。充分表明三峡工程经 40 余年充分论证、广泛开拓和采用国内外新技术，不断优化设计，是完全正确的。一流水平的工程设计是争创三峡一流工程的先决条件，我们还必须进一步与国内外工程技术界开展合作，吸取当今世界最先进技术，进一步提高设计水平。