

长江口深水航道治理工程的创新

范期锦

(长江口航道建设有限公司, 上海 200003)

[摘要] 经不断探索, 依靠技术创新和严格、科学的管理, 史无前例的长江口深水航道治理工程在复杂、恶劣的自然条件下取得了成功。文章论述了这一大型水运工程在设计、施工和管理方面创新的思维、作法和效果。

[关键词] 长江口深水航道; 工程管理; 设计; 施工

[中图分类号] TV851; U616 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)12-0013-14

1 工程简介

长江口是巨型丰水多沙河口, 经过长期的历史演变和近半个世纪的工程治理, 形成了目前三级分汊、四口入海的稳定格局, 主要的人海汊道自北至南为北支、北港、北槽和南槽。长江口大通站多年(1985年前)平均入海径流为 $9\,240 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (平均流量 $29\,300 \text{ m}^3/\text{s}$), 入海沙量 $4.86 \times 10^8 \text{ t/a}$ (平均含沙量 0.547 kg/m^3)。从1990年起大通站平均径流量为 $9\,510 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 入海沙量 $3.4 \times 10^8 \text{ t/a}$ 。由于咸、淡水交汇, 形成河口环流系统并产生细颗粒泥沙絮凝, 在河口下段出现最大混浊带和相应的浅水区, 即东西长达 $40 \sim 60 \text{ km}$ 的“拦门沙”区段, 最小滩顶水深为 $5.5 \sim 6.0 \text{ m}$ (理论深度基准面, 下同), 成为长江下游诸港和上海港海上运输的瓶颈。其中, 作为长江出海主要通道的北槽航道, 工程前通过疏浚维持 7 m 通航水深作为万吨以上海轮进出长江口的航道, 年维护量约为 $1200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

为打通长江口拦门沙这一制约长江三角洲经济发展的瓶颈, 自1958年以来, 一大批专家学者从不同学科专业角度, 针对长江口治理方案做了大量研究。特别是1991-1993年开展的“八五”国家重点科技攻关项目“长江口拦门沙航道演变规律及

整治技术的研究”取得了重大进展。根据河口总体河势的稳定性、受上游河势局部变化影响程度、过境底沙量及通达上海港的方便程度等, 选定北槽作为深水航道, 明确了采用整治与疏浚结合的工程方案(治理工程总平面图见封3图1)。建设分流口鱼嘴工程以稳定北槽有利河势, 控制分流、分沙比; 建造南、北导堤以归顺水流, 形成北槽优良河型, 阻挡堤外滩面泥沙侵入北槽, 归集漫滩落潮水流并拦截江亚北槽的落潮分流, 增强北槽水流动力, 消除横沙东滩窄沟对北槽输沙的不利影响; 建造19座丁坝以调整流场, 使自然深泓与航道轴线趋于一致, 增加航道范围单宽流量, 有利于深水航道的成槽与维护; 通过疏浚工程, 加速形成深水航道, 维护航道水深。

工程计划分三期实施, 使航道水深分期加深至 8.5 m , 10 m 和 12.5 m 。其中, 三期工程仅进行航道疏浚加深。各阶段的建设规模如表1。

经国家计委批准, 长江口深水航道治理工程自1998年1月正式开工。工程的项目法人——长江口航道建设有限公司动员组织了国内一流的科研、设计、施工和监理队伍, 坚持走技术创新之路, 依靠严格的科学管理, 使一期工程提前于2000年3月实现了 8.5 m 目标水深, 且自2001年4月至今, 实现了 8.5 m 深水航道100%的通航保证率, 产生

[收稿日期] 2004-08-31

[作者简介] 范期锦(1944-), 男, 四川成都市人, 长江口航道建设有限公司, 教授级高级工程师, 交通部专家委员会委员, 从事长江口深水航道治理工程建设管理

表1 长江口深水航道分阶段建设规模

Table 1 The grading construction scale of the improvement project

实施阶段	一期工程		二期工程		三期工程	合计
	计划	实际	计划	实际		
分流口	南线堤/km	1.60	1.60			1.60
	潜堤/km	3.20	3.20			3.20
南导堤/km	20.00	30.00	28.08	18.08		48.08
北导堤/km	16.50	27.91	32.70	21.29		49.20
丁坝/座·km ⁻¹	6/9.17	10/11.19	18/20.51	14/18.9		19/30.09
航道水深/m	8.5		10		12.5	12.5
航道底宽/m	300		350/400		350/400	350/400
航道疏浚长度/km	51.77		59.7		83.85	83.85
疏浚量/10 ⁴ m ³	4496	4074	7635		15 090	
工期/a	3	1998.1-2001.9	3	2002.5-	4	10
投资/10 ⁸ 元	32.55	30.88	63.37		28.75	123

了巨大的社会经济效益。二期工程于2002年5月开工,2004年底将完成全部整治建筑物工程的建设,2004年10月28日航槽平均水深达10.07 m,现已按9.0 m水深通航。

在这一我国史无前例的水运工程项目中,从建筑物的结构型式到施工工艺,从主要施工装备到管理理念和模式,处处贯穿着创新的精神,体现了创新的成果,本文拟就此作一简要介绍。

2 工程特点

2.1 施工条件差,工况恶劣

工程位于长江口北槽的茫茫江面,平均距上海外高桥江岸50 km,现场全部作业无陆基依托,常年受风、浪、流影响。综合测算,年水上可作业时间仅有140~180 d。

由于地处外海,水工结构与内河航道整治建筑物不同,必须承受强大的波浪力作用(随水深不同, $H_{1\%}$ 可达3~8 m);且河口地区的地基条件较差,除表层分布着1~6 m厚度不均的松散粉砂层(二期工程下游端缺失,直接为淤泥出露)外,下卧土层均为高压缩性和强度很低($N=1\sim 2$)的淤泥或淤泥质土。对于需发挥导流、拦沙、减淤功能的整治建筑物,一般应考虑采用重力式结构,但在大浪、软基的条件下,合理结构型式的选择则成了具有挑战性的课题。

2.2 工程量大,施工强度高

工程各类整治建筑物的总延长超过130 km,实物工程量汇总列于表2。为给航槽疏浚工程施工创造较好的掩护和减淤条件,一、二期工程的疏浚工程均宜在导堤基本成型后再开工。因此,从总进

度安排上要求每个月平均建成2 km以上的导堤。如此高的施工强度在国内外水运工程建设史上是前所未有的。

表2 长江口深水航道治理工程整治建筑物工程实物工程量表

Table 2 The engineering quantity of the engineering

序号	项目名称	一期工程 总工程量	二期工程 总工程量 (预估)	总量
1	砂被铺设/10 ⁴ m ³	0	79	79
2	塑料排水板打设/10 ⁴ m	0	550	550
3	软体排铺设/10 ⁴ m ²	600	616	1 216
4	袋装砂堤心/10 ⁴ m ³	21	35	56
5	半圆体安装(200及500 t级)/个	4 200	2 318	7 614
6	半圆形沉箱(1 000 t级)安装/个	0	544	544
7	钩连块体安放(2~10 t)/个	281 268	318 742	600 010
8	空心方块安放/个*	0	31 481	31 481
9	各类抛石/10 ⁴ m ³	223	505	728
主要材料用量				
1	土工布/10 ⁴ m ²	1 525	1 760	3 285
2	加筋带/10 ⁴ m	1 666	2 160	3 826
3	水泥/10 ⁴ t	30.6	38	68.6
4	混凝土/10 ⁴ m ³	92	138	230
5	充填用砂/10 ⁴ m ³	59	210	269

* 空心方块为2面空心体和6面空心体两种,每个分别重19t和15t

2.3 滩面物质具有高可动性

建筑物下的滩面主要由 $\bar{d}_{50}=0.086$ mm左右的粉砂组成,极易因水流作用而掀扬和运移。整治建筑物的施工又必然引起周边流场的改变,通常会使得沿堤流发育而加剧堤侧滩地冲刷,进而危及建筑物的稳定。采取能有效控制建筑物周边河床冲刷的

整治建筑物结构设计、施工工艺及工程管理措施，成为保证工程成功建设的又一技术关键。

2.4 局部河势变化的不确定性

长江口是巨型多汊河口，有其独特的水沙运动和演变规律，决不能照搬密西西比河口、莱茵河口等任何河口治理工程的经验；工程前 40 余年的研究成果虽然揭示了长江口水沙运动及河床演变的基本规律，提出了总体治理方案，但南支河段洲滩尚不稳定，北槽的来水来沙条件存在一定的不确定性；在当前技术水平条件下，作为整治方案基础的数模及物模研究成果尚不可能做到定量准确；尤其是对整治建筑物及疏浚工程施工过程中可能引起的局部流场及滩槽冲淤的变化尚未做过深入具体的研究。鉴于上述原因，长江口深水航道治理工程的建设管理不能简单地“照图施工”，而必须始终围绕获得最佳整治效果（以最小的工程代价获得全航槽设计水深，并以最低疏浚工程量稳定地加以维护），把现场监测、试验研究、设计和施工管理有机地结合起来，实施科学的动态管理。

2.5 整治建筑物顶高程在平均水位以下

由于长江径流丰富，长江口流场的特点之一是落潮流占优势。为了充分利用落潮流挟沙入海，在确保治理效果的前提下降低工程投资，经细致的研究、论证，在总体设计方案中，导堤顶高程统一确定为 +2.0 m（平均水位），潜堤和丁坝的坝头则取为 -2.0 m 和 ± 0 m。这一“半潜堤”的特点对结构波浪力计算、稳定性验算及施工方案等提出了新的课题。

3 创新的思维与做法

长江口深水航道治理工程有别于传统水运工程，因此组织工程建设需要一整套新的理念和做法。

3.1 创新的设计是工程成功的基础

3.1.1 总平面设计应不断优化 由于本工程自然条件的复杂性，上游来水、来沙条件及局部河势变化的不确定，以及当前数模、物模研究条件和水平的局限性，根据攻关成果确定的总平面设计方案必须经过工程实践的检验，不断以现场动态监测成果为依据，以提高整治效果为目标，以实验研究为手段进行调整和优化。

3.1.2 整治建筑物要采用创新的结构 国内外各种已有的堤坝类水工结构均只在具体的水文、地质

及施工性等条件下才有其相对的合理性。各种传统堤坝结构型式均不可能综合适应前述本工程的特点。因此，必须在参考、引进的基础上进行优化或采用创新的结构。

例如袋装砂堤身结构较适合多砂少石地区，在长江中下游及江浙一带的护岸、围堤工程中有大量成功应用的实例，但在 1996 - 1997 年间黄骅一期引堤工程横堤及巴基斯坦卡拉奇国防区吹填围堰等 4 项工程中的大型充砂袋堤身结构均发生了严重破坏，被迫又改为抛石堤方案。上述工程成败的分析表明，关键在于充砂袋抗浪稳定性较差（试验显示，顶层砂袋的临界稳定波高为 $H_{1/3} \approx 1.0$ m），故在长江口工程中应用时，必须加强其护面结构^[1]。

3.1.3 对整治建筑物新型结构选型及设计的基本要求

1) 能有效保护建筑物下河床底质不会被冲刷、流失，控制周边河床的冲刷发展；

2) 堤（坝）头纵横断面形状应有利于改善流态，限制会引发冲刷的涡流的产生和发育；

3) 结构型式必须有较强的抗波浪力的能力，且同时对地基承载力的要求较低；

4) 鉴于长江口落潮流呈优势，整治水位采用中水位，对堤顶高程的精度要求不高，为加快速度、降低投资；结合前款，结构设计宜尽量不采用先期加固软基、消除部分沉降的方案，而宜采用控制施工期堤顶高程，预留地基沉降量的措施；

5) 结构断面简单、施工工序少，并应增大预制安装的比重；

6) 重视提高结构未全断面建成时的施工期抗浪稳定性，避免或减少风损和返工修复；

7) 根据长江口地区建材资源的特点，尽量少用石料多用砂。

3.2 创新的施工组织和工艺是工程成功的物质技术条件

组织工程建设时，高度重视了施工组织及工艺技术的创新，主要做法有：

1) 施工分段（标段）的划分、龙口位置的选定及合龙施工原则、导堤/丁坝/航槽疏浚总体进度的协调安排等均依据试验研究成果，按照有利于保证局部河势稳定，有利于建筑物周边促淤防冲，有利于航槽调流减淤的原则慎重确定。

2) 要求施工工艺必须满足设计要求并适应本

工程特点；施工技术及装备则必须据工艺要求选择，因此，研制开发了涵盖工程水上施工主要工序的一批大型专用设备。

直至20世纪90年代，我国水运工程施工企业基本上依靠“常规武器”（方驳、拖轮、起重船、打桩船、混凝土拌和船等）施工，即使计入少量的浮船坞、半潜驳和平台船，也基本上为适用于各类常见水工结构的通用装备。虽然从国外经验及国内水运工程的发展趋势考虑，水运工程界普遍认识到开发新型结构及相应研制新型专用施工船机势在必行，但开发、研制资金的短缺及难以从工程款中回收成本的核算结果，一次次使各种新型专用设备的开发计划最终落空，如上世纪70年代的整平机研制及90年代的海上深层水泥拌和船的开发均如此。这种状态已严重阻碍了我国水运工程的技术进步。但长江口深水航道治理工程不仅规模宏大，而且水工结构工序少，单一工序工程量巨大，要求作业强度高，水上作业条件恶劣，这不仅对新工艺及专用设备的开发提出了迫切要求，也从开发研制费用的投入与回报的角度提供了充分的可行性，使大型施工企业愿意并下决心走高投入、高回报的良性发展之路。

3) 根据工程的结构特点和施工条件，应力求水上主要工序做到流水、均衡、高速推进。因此，我们注重的是各类单一功能（只完成单一工序，如软体排铺设、基床抛石整平等）高效专用作业船的开发；采用多功能作业船的方案对于本工程是不可取的。

4) 工程远离陆域，跨度达数十公里，传统经纬仪、全站仪等各种测量定位手段均不适用，因此，我们组织了技术攻关，在国内首先实现了全面采用实时、动态、高精度的GPS测量定位技术。

5) 工程施工强度高，流速大（常达2 m/s以上），流向多变，江水浑浊，从安全、质量和效率考虑，除必要的水下检查项目外，所有工序均已取消了水运工程中传统的潜水员作业。

6) 新工艺和施工装备的开发充分集成了现代先进技术成果，基本实现了机械化、自动化、智能化，并特别重视了对施工过程（状态）和质量的监控。

摒弃了以统一的风速和浪高作为水上可作业标准的传统观念，树立了不同工序、不同抗浪稳定性的作业船应有不同的安全作业标准的新理念，建立

了抗浪生存与抗浪作业两级标准，提高了专用作业船的抗浪能力。从施工组织和船舶调度上强化了在保证安全的前提下，减少船舶无效往返拖航，充分利用好每一个水上可作业天的意识。

3.3 创新的管理是工程成功的保障

作为工程项目法人的长江口航道建设有限公司是一个仅有30余名员工的国有企业。公司除坚决实行了招标投标制、工程监理制，对与工程有关的科研、设计、施工、监理均实施了严格的合同制管理外，根据工程的特点，在管理创新方面还做了以下有成效的探索：

3.3.1 提供技术创新的平台 创造创新的条件和氛围，激励参建各方走技术创新之路的自觉性和积极性。公司通过招标文件、各种工程管理例会及专题研讨会等，系统地把工程的创新思维转化为参建单位的共同认识和行动。

一期工程招标时，我们要求施工和设计单位组成联营体投标，并允许投标单位提出替代设计方案；二期工程工可编制前，我们即组织了全国性的整治建筑物设计方案竞赛及优化方案评审等活动。一、二期工程整治建筑物主要采用的二种新型结构——优化的袋装砂堤心斜坡堤和半圆堤正是这样从数十种方案中脱颖而出的。

我们在一期工程招标文件中承诺，各标段中标施工单位若开发研制适合本工程条件的大型专用作业船，建设单位可提供技术装备费1500万元。此举得到各施工企业的热烈响应，粗略统计，三家中标单位实际用于研制开发新型专用设备的费用超过1.5亿元。

一期工程施工期，每次季度例会均首先安排总体设计院根据监测成果分析随工程进展而出现的现场水文、泥沙运动特征和局部河势变化，大大提高了各施工单位严格控制总体施工程序，服从工程动态管理的自觉性。

3.3.2 实行法制化、标准化、信息化管理 对工程的法制化管理主要体现在两个方面：

一是认真编制好招标文件。我们要求招标文件要充分体现公开、公平、公正的原则；要做到严密、细致、操作性强、无歧义；技术规格书要明确、具体地反映出全部设计意图、技术标准和建设单位的管理要求。

二是工程建设过程中的全部技术经济行为都必须有文字档案，任一数据均有出处，任一活动和行

为均有据可查。

实行法制化工程管理的好处是使工程建设各方权责明晰，相互关系正常、融洽，不扯皮，不推诿，管理效率高。

为实现对工程的标准化、规范化管理，在行业主管部门的大力支持下，针对本工程新结构、新工艺、新船机多及工况条件的特点，先后组织编写了本工程适用的全部专项标准，所有专项标准均严格按程序经部审发布后执行。

工程开工初期，即制订了《工程档案管理办法》，统一制订了本工程全部监理用表（整治建筑物工程 5 类，100 余种；疏浚工程 5 类，45 种）。对工程动态管理所必须的由施工单位实施的固定断面监测制度和总体设计院负责的河势监测制度等也都做了具体规范。

在信息化管理方面，建立了全工程的数据信息传输网络。施工、监理单位和公司内部全部实现了计算机管理并相互联网。全部工程管理数据“一本帐”，使工程信息做到了数据真实、准确，传输及时，利用方便。

3.3.3 实施了严格、科学的动态管理 工程实施的全过程，均需以稳定河势为中心，以确保稳定地获得航道水深为目标，严密监测整体河势和整治建筑物推进及航槽疏浚过程中河床的局部变化，监测流场及河槽的冲淤变化，利用数学、物理模型进行必要的验证和研究，适时地对工程做出必要的设计变更，调整施工方案和施工计划，保证工程顺利实施和整治目标水深的实现。经不断探索，我们总结出一套对本工程实施动态管理的基本程序（图 1）。

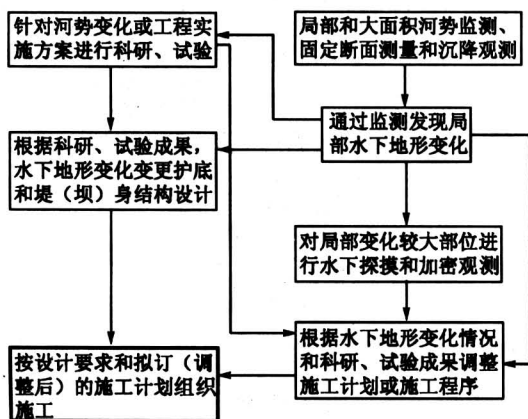


图 1 工程动态管理的基本程序

Fig.1 The basic procedure for engineering dynamic managing

4 创新成果

4.1 整治工程总平面布置更加优化

2000 年，一期工程按原设计（建设分流口工程、16.5 km 北导堤、20 km 南导堤及南北各 3 座丁坝，航道水深 8.5 m）完工后，取得了明显的整治效果。南北槽分流口的优良河势被稳定；北槽上分流口断面分流比虽略有减小，但自然航槽水深仍有所加深；加之封堵了江亚北槽，增强了北槽上段落潮流水动力，使北槽上段冲刷及深槽下延，丁坝段滩面自然水深增加了约 2 m。但动态监测的成果也表明，一期工程原设计的南北导堤及丁坝的控制范围不足，未能有效地调整和稳定北槽主流；经尚未封堵的横沙东滩窄沟入北槽的落潮流水不仅形成 W_3 以上段不良流态，还带进了北堤北侧沿堤流冲刷下泄的大量泥沙； W_3 附近涨落潮流路分歧，且水流与航道轴线夹角约 11° ；加之一期丁坝段滩面冲深带来的泥沙，使北槽中段航槽淤积，8.5 m 水深的维护一度困难。

按照动态管理的原则，根据监测和多方案模型试验的成果，2000 年 11 月至 2001 年 6 月实施了完善段工程。一期南北导堤分别延长至 30 km 和 27.91 km，增建了 N4、N5 和 S4、S5 四条丁坝，丁坝的平面位置和长度也做了适当调整。

完善段工程实施后，调整了北槽中段的水流动力，底流与航道轴线夹角减小了 $4\sim 5^\circ$ ， W_3 转弯段恢复冲刷，全槽形成了上下深槽平顺连接的微弯态势，一个稳定的、具有一定宽深规模的自然深泓已基本覆盖航槽。北槽航道的维护条件显著改善，自 2001 年 4 月至今，8.5 m 水深通航保证率做到 100%。

对比完善段工程前后深泓线变化图（见封 3 图 2），可明显看出这一局部调整的优化效果。

一期工程特别是完善段工程深化了我们对整治建筑物特别是丁坝群对整治效果能动作用的认识。二期工程前，我们以一期各阶段大量地形、流场监测资料作验证，开展了多方案的大型数、物模总平面方案优化试验研究。经严格的论证、分析，交通部组织审查后于 2003 年 7 月批准了我们推荐的总平面布置优化方案（见封 3 图 3 及表 3）。

虽然按优化总平面施工的南北导堤要到 2004 年末才能完工，截止 2004 年 2 月，二期丁坝工程尚仅完成了 N1~N5 丁坝的续建（延长），但监测

表3 优化前后丁坝长度对比表

Table 3 The spur dyke length comparison around optimizing

丁坝名称	初步设计长度/m	优化后长度/m	丁坝名称	初步设计长度/m	优化后长度/m
S1	1 186	771	N1	1 098	1 300
S2	1 251	813	N2	1 848	2 000
S3	1 317	856	N3	2 486	2 700
S4	1 418	1 000	N4	2 400	2 700
S5	1 600	1 600	N5	2 055	2 050
S6	1 563	2 100	N6	1 807	1 300
S7	1 696	2 200	N7	1 681	1 000
S8	1 829	2 300	N8	1 583	1 000
S9	1 962	2 400	N9	1 500	1 000
			N10	1 425	1 000

表明, 上段深槽继续下延, 深泓位置已更加与航道轴线吻合, 2004年2月的全槽水深测图(封3图4)可清晰地反映出已呈现出的良好治理效果。目前, 10 m水深基建疏浚的成槽效率较高, 5月10日全槽已开始按9 m水深通航, 优化后的整治方案必将会实现更理想的整治效果。

4.2 成功地采用了多种创新的整治建筑物结构

4.2.1 新型的护底软体排结构 在滩面物质具有高可动性且流场复杂多变的长江口修建整治建筑物, 可靠的护底结构设计, 排体材料的选择及配套的高效、优质施工工艺的开发, 是工程成败的关键之一。经大量的研究和探索, 在交通部的支持下, 1997年底又专门在南导堤实施了各种不同类型护底软体排的试验段工程。在各方的不断努力下, 形成了一套有关软体排设计的成功经验。

1) 软体排的设计功能及排宽的设计原则。护底软体排的功能是“保砂”, 但并不是要求所覆盖的床砂不能流失, 它必须足够“软”, 即能良好地适应地形的变化。这里既要求它应能随铺设床面地形的起伏而变形, 有良好的贴附性, 又要求在排外侧床面发生冲刷时, 能自然下垂, 附在冲刷沟内坡面上。在堤侧冲刷主要由沿堤流引起的情况下, 堤侧冲刷沟距堤轴线的位置将随排宽(这里指排边距堤轴线的距离)的增加而外移, 在一定的水流条件下, 最终稳定冲刷坑的深度除与底质(如粒径、粘性颗粒含量——“抗冲能力”)有关外, 将随排宽的增加而减小。因此, 软体排最根本的功能乃是依靠足够的排宽, 使排外形成最终稳定冲刷坑(即冲刷坑近堤轴线的内坡不再向堤轴线方向发展)时, 能确保建筑物地基的整体稳定性。

所以, 排宽的设计应首先逐堤段根据地基土壤条件和建筑物结构断面, 取设计低水位并考虑堤内外可能出现的不利水位差, 采用圆弧滑动法验算堤侧床面受冲刷后允许形成的最陡边坡坡度(可以概化为冲刷坑底与堤身结构坡脚位置的连线坡度)。其次, 通过局部正态动床物模试验, 研究堤侧冲刷坑位置与深度的变化规律, 再结合堤坝沿线水下地形, 考虑排宽不宜骤变及一定安全度, 最终确定设计总排宽。

由此可知, 工程初期“先确定堤身两侧的余排(指堤身结构坡脚至排边宽度范围的排体)宽度, 再加上堤身下的排宽, 作为铺设总宽度”的设计方法是不妥的。由于本工程堤顶高程统一取中潮位(+2.0 m), 堤身高度及堤身底宽不断地随水深变化而改变。对余排取等宽的堤段, 设计出来的排体总宽就是不等的, 势必造成相邻两张排体边缘出现错牙。这又往往导致在相邻排体边角位置出现楔形冲刷坑, 进而发展到搭接缝被撕开, 局部护底失效。此种破坏, 南、北导堤和丁坝工程中已发生过数例。

根据前述设计原则, 流态、水深、底质、建筑物的坡面形式均应成为排宽设计考虑的条件。故一般而言, 堤(坝)的内外侧, 堤(坝)身段与堤(坝)头处护底软体排的宽度是不同的。本工程排宽范围在30~160 m不等。

同样根据前述原则, 工程实施中如监测发现堤侧冲刷沟的发展超出设计预测时, 还可以在保证与已铺设余排有足够搭接宽度和锚固能力的前提下加宽铺设余排。一期北导堤外 N13+000 至 N16+800 的实践已证明了这种措施是简便有效的。

2) 软体排压载材料的设计。在底质的冲淤对底流变化十分敏感的长江口, 宜采用结构厚度较薄的排型。抛石压载软体排(排体搭接形态示意图2)由于抛石厚度为60~90 cm, 扰流作用强, 易引发排侧冲刷, 经试验段工程后, 在正式工程中未予采用。但用于试验段的1 km堤段在1999年大潮期仍发生了堤身的沉陷。经查明, 是由于此种排体搭接质量难以保证, 堤内外50 cm以上的水位差引起的排下渗流即可导致床沙从接缝块石缝隙中流失所致^[2]。

本工程中主要使用了砼联锁块和袋装砂肋两种排体压载材料。代表性的软体排结构见图3。砼联锁块排单价较高, 主要用于堤(坝)头周边易产生

三维冲刷（冲刷坑）的部位；长管砂肋排虽然价格较低，但充砂管有一定的刚度，适用于易产生二维冲刷（冲刷沟）的导堤、丁坝的堤（坝）身段。

3) 大量采用新型土工织物材料制作排体。从护底结构的功能考虑，软体排体使用新型建材——土工织物是势在必行。一、二期工程各类土工织物总用量达到 $3\ 285 \times 10^4 \text{m}^2$ 之巨，超过了我国水运工程迄今为止的用量之和。

本工程创新地采用了涤纶无纺布与丙纶机织布通过针刺复合的新型排体布，在确保排体有足够抗拉强度的同时，提高了其“保砂透水”性能。特别是我们对土工织物人工加速老化试验研究的成果表明，无纺布在上的普通复合布在紫外线照射 504 h 后的断裂强度保持率仍有 63.91%，是采用掺抗老化剂的复合土工布的 6.86 倍。在本工程中易导致排布老化的浅滩区段，均采用了这一防老化措施。

4.2.2 不断优化的袋装砂堤心斜坡堤结构 图 4 为一、二期工程采用的袋装砂堤心斜坡堤的典型断面图。一期工程采用的袋装砂堤心—钩连块体护面—模袋砼压顶的斜坡堤结构，较初步设计阶段提出的模袋砼护面结构为优。这是由于：a. 在断面工程量中，最大限度地保留了袋装砂结构作堤心，这

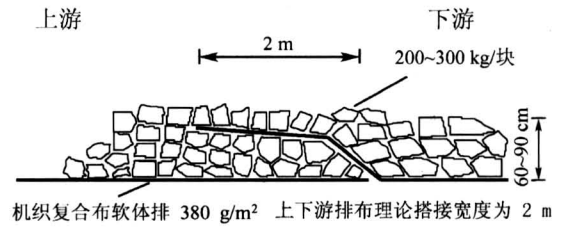


图 2 抛石压载软体排搭接处断面示意图

Fig.2 The sectional drawing of rock suppress mattress's joining position

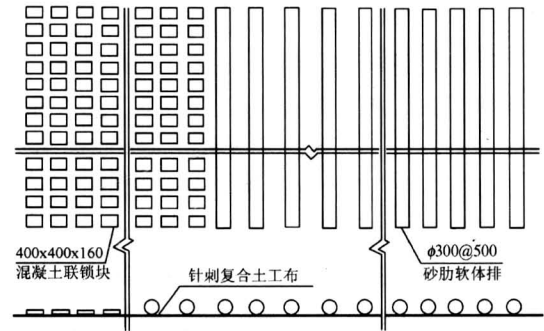


图 3 混合式软体排结构示意图

Fig.3 The structure sketch map of composite mattress

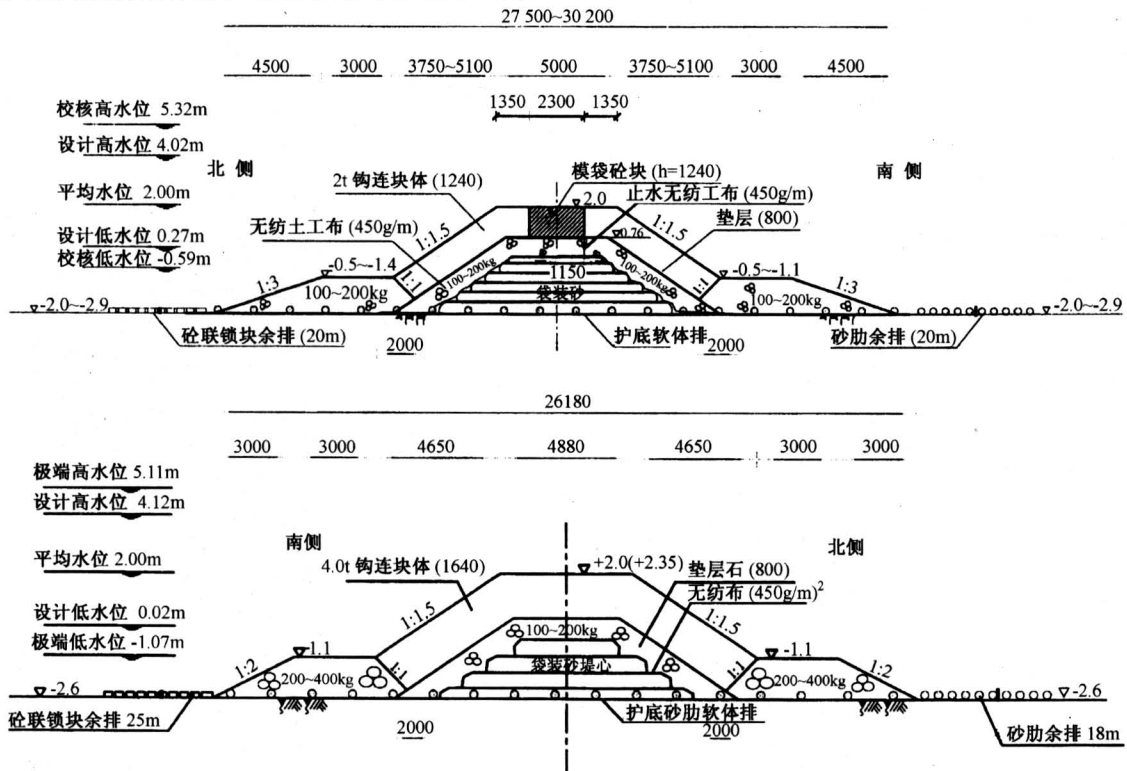


图 4 一、二期工程袋装砂堤心斜坡堤的典型断面图

Fig.4 The model sectional drawing of different stages' sand bag mound core sloping bank

是适应长江口地区多砂少石这一资源条件的，因而比较经济；b. 以抗浪能力强，对地基和堤身变形适应能力强的钩连块体代替易因地基和堤身变形而破裂的模袋砼，提高了建筑物的耐久性；c. 增大了预制安装比重，减少了水上赶潮现浇砼工程量，有利于保证工程质量，加快施工进度。

但是，在2000年五次台风影响长江口地区时，风后检查仍发现有近千个2 t钩连块体被风浪打落或严重移位。据调查分析，风损位置并未发生超过2 t钩连块体抗浪能力（波高 $H_{1/3} = 3.1$ m 以上）的波浪。局部风损的原因虽与试验、施工方法均存在一些不足之处有关，但根本原因在于压顶模袋砼结构隔断了内外坡肩钩连块体的钩连，且这种状态下保证坡肩单层钩连块体稳定性的设计方法并不成熟。因此，最佳方案应修改设计，取消压顶模袋砼，使内外坡护面块体相互钩连^[3]。

一期工程斜坡堤设置压顶模袋砼的初衷，是担心改成空隙率大的钩连块体后会导致堤身透水性增大，弱化导堤整治功能。为此，结合数模计算和一期工程的实践经验，经详细论证，排除了此疑虑^[4]，使斜坡

堤结构在二期工程中又做了如图4所示的优化。至2003年6月，这种全钩连块体护面的斜坡堤，在二期工程南导堤 S30+000~S41+700 已建成了11.7 km，迄今完好无损，且堤外冲刷沟稳定，堤内坝田区已普遍淤积，证明了此优化设计是成功的。

4.2.3 创新的半圆形堤身结构 半圆堤是日本在上世纪80年代开发的一种新型重力式防波堤结构。但日本仅在宫崎港完成了总长36 m的试验堤，迄未在正式工程中采用。我国1995年引进半圆堤型式，在天津新港南疆设计建造了530 m的防浪围堤。引进时，通过模型试验对日本半圆堤的设计计算方法进行了验证，证实了日本包括“底板泄压孔开孔率大于10%时不计波浪浮托力作用”的设计方法基本是正确的。但设计施工中根据我国国情改为钢筋砼结构，并采用了在预制场连续浇注成型的工艺。

鉴于半圆堤优异的几何特性，波压力相对较小，对地基承载力要求较低，且其水上作业工序少，安装后即有较强的抗浪稳定性，特别适合本工程的特点。作为防波堤使用时，其越浪量较相同顶高的直立堤大这一弱点在长江口作整治建筑物使用则无大

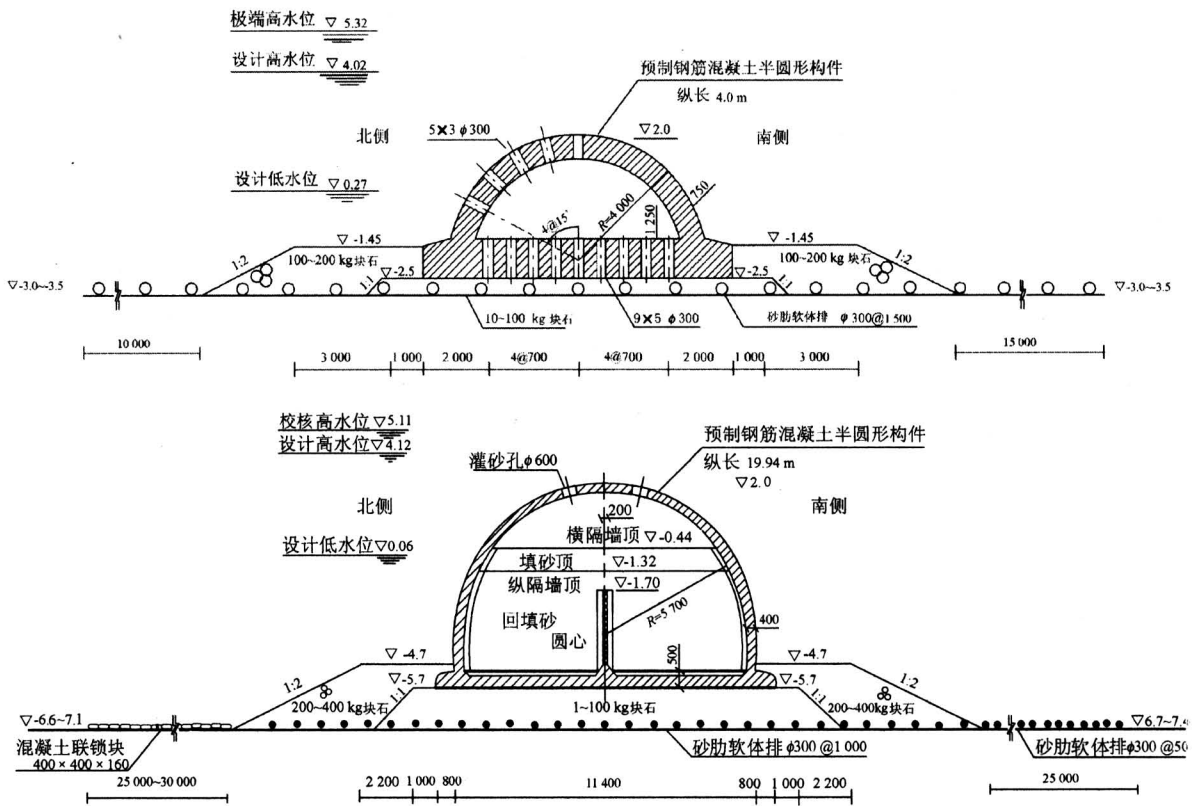


图5 一、二期工程典型半圆堤结构断面示意图

Fig.5 The model sectional drawing of semicircular structure bank in the first & second phase engineering

碍。但是本工程导堤顶高在 +2.0 m，高潮位时堤顶淹没，底板开孔减少浮托力的作用不能考虑，为此设计单位对日本的波压力计算经验公式作了修正，还开发了半圆体结构上波浪力计算的数学模型。

这样，经我国工程技术人员在设计、施工方面做了重要改进后，半圆堤终于成为一种施工简便、造价较低的新型堤坝结构而被本工程大量采用。一、二期工程采用半圆体结构（图 5）的堤坝段总长达 50.01 km。

为进一步节省投资，在总结一期工程经验的基础上，二期工程采用的半圆体取消了在本工程具体条件下作用不大的拱壁和底板开孔，封堵了两端壁，减薄了拱壁和底板砼厚度，增加了腔内填砂，以期在保证其稳定重量的同时，由于以沙代替部分钢筋砼，进一步降低了工程造价。

二期工程半圆堤结构的改进对投资的节约效果是明显的，但增加了水上充砂工序及充砂孔封堵工艺，加大了保障结构施工期安全的难度，这也是应充分予以重视的。

4.2.4 新型空心方块斜坡堤结构 北导堤 NIIC 区段（N46+600~N49+200，共 2.6 km）地基上层全部为淤泥或淤泥质土，压缩性大，强度极低（ $N=0\sim 2$ ），且该堤段设计波浪又是整个工程中最大的。自 2000 年起，公司即通过设计方案竞赛、优化评审等方式向全国征集设计方案。经多方案比选，在交通部大力支持下，2001 年决定在 N49+200 处先期进行插入式钢筋砼大圆筒结构试验段施工。这种结构不须对软基预作加固处理，造价较低，是一种很有前途的新型结构型式。但不少专家认为，应通过现场试验，对该方案主要考虑以土壤对结构的摩阻力保障结构稳定的设计方法和在海外恶劣条件下的施工工艺予以验证和完善后再大规模应用。

试验段工程在全部工序施工工艺的探索方面取得了极大成功，特别在应用当时世界最大的 APE-400 型大型液压锤组对钢筋砼圆筒震动下沉的相关结构计算、内力测试及全套工艺技术方面取得了系统的成果，还与美国 APE 公司协力攻克了 4 台大型液压震动锤同步工作的世界级技术难题^[5]。但就在水上施工全部完成，拟进行最后一项现场水平力试验之前，在 2002 年 7 月 4 日威马逊台风中，试验段 4 个圆筒全部倾覆。

经详细的调查分析、验算和多次专家会讨论，认为结构破坏的主要原因在于结构稳定性的验算方法、土壤力学指标的选用、筒顶块体的设置及筒周护底结构措施等方面还存在不足之处。

再次探索 NIIC 导堤结构型式时，一航院针对该区段地基承载力极低而波浪力巨大这一显著特点，提出了具有高抗浪稳定性而堤身重量仅为常规斜坡堤 1/3 的空心方块斜坡堤方案（见封 3 图 5）。

对这种结构的最大疑虑在于过大的空隙率（超过 60%）是否会影响导堤导流、拦沙、减淤功能的发挥，从而影响整治效果。经历时半年的水槽及整体物模试验，得出了其影响范围和程度是可以接受的结论。

现在 NIIC 区段正按此方案紧张施工，我们将做持续的监测，并已完成减小堤身透水性的后续施工备用方案的研究，以确保建筑物安全和工程整治效果。

4.2.5 我国首例抗“软化”措施的工程实践

2002 年 12 月初，北导堤 N40+860~N41+160 区段已安装的 16 个半圆形沉箱在寒潮大浪作用下发生了异常沉陷。全面的调查、验算、复勘及补充模型试验均未发现设计施工有明显失误。根据对破坏形态、地基变形特征、连续观测到的堤身沉降变形规律，两次大型破坏原因分析会的讨论，包括与日本有关专家进行的深入研究，特别是开创性地利用动三轴仪开展的模拟波浪动荷载作用的软粘土强度降低规律的研究，明确了“周期性作用的波浪荷载经沉箱、基床传递给地基后，引起近表层土（本工程中指②_{2.0}层淤泥和②_{2.1}层淤泥质粉质粘土）的软化，承载力降低，是地基破坏、沉箱表现出剧烈沉陷的主要原因”^[6]。

对于常规重力式结构，由于天然或经加固后的地基土具有较高的静强度，波浪力在地基中产生的动应力水平相对不高，极少发生“软化”现象。所以现行规范中除对砂性土在地震荷载作用下的液化问题做出了明确规定外，对波浪这种相对低频的动荷载作用下地基中软粘土的强度降低问题并未做出规定，波浪荷载也均转化为静荷载处理。但在长江口软土、大浪、堤身采用了轻型半圆形结构的新型工况组合条件下，强度原本不高的软粘土震后强度进一步显著降低（三轴试验表明可降低 64%），从而导致本工程堤身结构出现了始料不及的剧烈沉降。

模拟波浪荷载的动静三轴试验发现,在本工程的地质及荷载条件下,土样在自重应力下固结后,即可具备抗“软化”的能力。由此,使我们认识到,尽管目前世界上对“软化”现象产生的机理及由土壤的静、动强度特性,所受到的静、动应力水平等定量预测软化程度的理论和方法的研究还很不成熟,但可以针对本工程具体条件,用室内试验及现场试验与监测相结合的方法制订出可行的防软化对策。这就是“增设排水通道,以部分结构重量为予压荷载,先期提高近表层有限厚度及易软化淤泥质土的强度,使其具备施工期抗软化能力后,再施工上部荷载”。具体设计方案为:在地基表面铺设砂被作水平排水通道,以穿透②_{2.0}或②_{2.1}土层为有限范围施打塑料排水板作为竖向排水通道,以原设计堤身结构中的抛石基床及部分压肩棱体石作预压荷载,加速易软化土层的排水固结,待其静强度达到实验室给出的抗软化静强度标准后再安装上部沉箱结构及充填砂。

在现场典型断面试验工程取得理想的加固效果后,交通部批准了本工程兼具“抗软化”能力的半圆堤修改设计(见封3图6)。目前,按此设计恢复施工的NⅡB标段已完成全部8.6 km的软基加固施工,半圆形沉箱已安装6 km以上。根据试验段的跟踪观测,堤身沉降变形监测等多方面监测结果分析,并经有效波高超过3 m的0407号台风“蒲公英”和0414号台风“云娜”的实际考验,表明长江口工程大规模软基加固工艺是成功的,加固效果是理想的,我国首次采用的对浅层软粘土的抗软化结构设计方案是成功的。

4.2.6 橡胶阻滑板首次用于水运工程 NⅡB区段“软化”破坏发生时,已有总计约1 km的堤身完成了基床抛石,该区段难以施打塑料排水板加固。借鉴日本的成功经验,在沉箱底面增设橡胶阻滑板,将结构与基床抛石的摩擦系数由规范取值0.6提高到0.75,相应减少箱内填砂重量,从而降低结构对地基的承载力要求,加之该区段地基表层分布有较厚的粉细沙,经验算,即使采用“软化”后的地基土强度指标,同样可以做到同时满足结构抗滑和地基稳定的要求。

由于采用橡胶板增大重力式结构的抗滑力在我国是一次全新的尝试,我们与设计院、科研院校和橡胶板生产厂密切合作,研究解决了橡胶板材质及主要物理力学指标标准,橡胶板与钢筋砼沉箱底板的锚固方

式及工艺措施,橡胶板质量特别是与基床块石间摩擦系数的实验室检验方法等一系列实用性课题,并初步探讨了影响摩擦系数的主要因素及控制措施。

经检验合格的、本工程所需的29 580块2 000 mm×1 000 mm×30 mm的橡胶板已全部交货,且大部分带橡胶板的沉箱已预制安装完成。分批抽检的37块样品的摩擦系数平均值达0.892,大大超过了设计采用值0.75。已安装带橡胶阻滑板的半圆形沉箱堤段已顺利通过了今年多次较强台风的考验。

4.3 确立了科学的总体施工程序

一期工程开工前,尚未对治理工程的具体施工程序做研究,只是提出了“先导堤后丁坝”的原则。对导堤分段施工后临时堤头的安全、龙口施工的难度及龙口水流可能恶化局部河势等存有疑虑。因此,工程合理的施工程序只有在实践中研究解决。通过定床物模试验对多种可能的丁坝施工程序组合方案进行了比较研究,主要以稳定北槽流场为着眼点,以坝头前流速变化为指标,提出了“一期3对丁坝均暂按原设计长度1/2(后调整为2/3)实施”和“南北相向、上下游丁坝按原设计长度同比例、分阶段同步推进”的施工程序控制原则。实施中发现,虽然丁坝段出现了深槽发育的效果,但随着丁坝的推进,近槽坝田区经历了一次“先冲后淤”的过程,航槽两侧边滩泥沙冲刷下泄累计达 $6 000 \times 10^4 \text{ m}^3$,成为2000年W₃上段淤积严重的原因之一。

完善段4条丁坝施工时,把过程监测重点放到流场变化而不是滞后3~6个月才出现的地形变化上,减少了分阶段带来的坝田区无效冲刷,4条丁坝快速建成取得了理想的整治效果,N5/S5丁坝出口段也未出现曾令人担心的航槽淤积。

二期工程开工前,利用模型试验开展了系统的优化整治建筑物施工程序的研究。施工程序方案包含了导堤(含不同分段方案)-丁坝-基建疏浚的多种组合,优劣的判断标准也扩展为流场变化、成槽效果、地形调整量及对航槽的影响等。据此,确定了二期北导堤分三个标段5个作业面,南导堤分二个标段3个作业面的施工原则及合龙位置;确定了按优化平面布置方案建设的丁坝施工程序为:

首先续建(延长)N1~N5丁坝至设计全长,下游N6~N10/S6~S9共9条丁坝可在根部两侧导堤已建1 km以上时开工,并应同时满足“南导堤可先于北导堤,南丁坝应先于北丁坝,同侧上游侧

丁坝应依次先于下游侧丁坝建成”的原则。

N1~N5 丁坝于 2004 年初已完成续建施工，北槽上段深泓略偏南的状况大为改善；下游 9 条丁坝虽开工不久，北槽下段 8.0 m 深泓线也已有所发展。目前的监测资料表明，按这一套施工程序组织施工，北槽的地形和流场的变化是平稳良好的。

在整治建筑物具体的施工程序方面还取得了以下宝贵经验：

1) 为避免待建堤坝段地基的冲刷，危及建筑物安全和增大工程量，整治建筑物下的护底软体排必须先于堤身超前施工，超前距离视已建堤身对原天然流场的影响范围而定。封堵横沙东滩窄沟后，北港原经窄沟的落潮流沿北堤北侧向东，绕过临时堤头后大范围南泄，但北导堤推进至此时的护底结构已做到超前 3 km，保证了导堤轴线床面未受冲刷。

2) 施工中临时堤头必须连续推进，不能在某里程长时间停滞，以削弱绕堤流对堤侧床面的冲刷。进一步的研究证明，护底软体排及抛石基床结构厚度有限，对流场的影响较小，可以超前施工，但出水结构（如斜坡堤堤心、半圆体堤身）的形成则必须连续推进。这样，堤侧冲刷的区位一般也会随堤身前进而前移，不致在同一断面持续发展。

3) 长江口导堤的合龙不是江河截流，龙口流速取决于该处原天然水面横比降及因修建导堤而增大的堤内外水位差。据多处龙口合龙施工的经验，可以二维潮流数模的计算成果指导龙口位置、宽度等的确定。合龙施工程序^[7]的要点可概括为：

(1) 宜选择水深相对较深的堤段为龙口。因龙口处有较大过流断面，龙口两侧大部分导堤可在流速相对较小的条件下平稳有序施工；深水段一般采用半圆体等堤身结构，抗流能力强，可一次出水，断面工序少，有利于快速合龙。

(2) 一般在两堤头相距约 2 km 时，缺口处流速开始增大。故此前应完成龙口段的护底施工及基床抛石整平等对流场扰动较小的分项工程的施工。

(3) 龙口段施工以堤身主体连续快速推进为主，不强调护面、护肩的跟进。

(4) 经多个龙口的计算和实测，导堤龙口最大流速一般发生在龙口缩窄至 200 m 左右时，此后直至合龙不再增大。因此，应以此最大流速选择施工工艺和船机组织，选择一个小潮汛期（潮差小，龙口流速也相对较小，一般在 3 m/s 以下），昼夜

不停，连续施工，直至合龙。

(5) 为加快合龙速度，半圆体堤身构件可采取在已平整好的抛石基床上先摆放、后调整的安装工艺。合龙完成后，再重新逐块按质量标准进行二次安装。

按照上述原则，已在南、北导堤组织过 5 次合龙施工，均获得成功，且除个别龙口段加宽了护底范围外，未再采取其他结构措施。

4.4 创新的施工工艺和装备

超高强度的进度要求，全新的工程结构，浪大、流急、软基、开敞等常规施工工艺和装备完全无法适应的恶劣工况集于一体的长江口深水航道治理工程，只有选择工艺和装备的创新，才能使正确的整治方案和创新合理的设计蓝图成功地变为现实。

4.4.1 创新地采用了 GPS 测量技术 为满足工程整治建筑物采用北京 54 坐标系和吴淞高程系统的要求，攻克了三维坐标转换和远距离高程传递的技术课题，建立了首级和二期 GPS 控制网（见封 3 图 7）；实现了实时、动态、高精度（ ± 5 cm 以内）平面与高程控制；创造性地将 GPS 高程测量与超声波水深测量结合起来，实现了水下地形无验潮测量，取消了繁琐、滞后的潮位修正作业，提高了水深测量的效率和精度；开发了所有需定位作业施工工序的应用软件，把 GPS 测量技术、传感器技术、计算机数据处理及图像显示技术等结合起来，提高了作业船的自动化、信息化施工水平，提高了施工效率和精度；全部水上工序，所有大型专用作业船，水深测量船及全部沉降位移观测均配置了 GPS 移动站，二期工程 GPS 设备总用量已突破 100 台（套）；除两座 GPS 基准站差分信号发射天线塔外，本工程中未设任何定位测量的大型临时设施。

4.4.2 独创的大型专用作业船 整治建筑物水上各主要工序全部采用了独创的，甚至在世界上也是独一无二的大型专用作业船施工。二期工程中使用的大型专用作业船（机）汇总如表 4。

这些专用船机的共同特点是：

1) 适应长江口恶劣的工况条件。这些作业船均针对长江口工况条件研制，排水量较大（2 000~7 000 t），锚系坚固（一般采用 35 t 锚机 6 台，5~7 t 海军锚，锚缆长度 200~500 m），因此抗风浪生存和作业能力强（一般 8 级风以下可就地抗风，6 级以下可正常作业）。这就大大减少了避风往返拖带的航次，增加了水上有效作业天（一般可

达 200 d/a)。

表 4 大型专用作业船(机)汇总表

Table 4 The summaries for large-sized special purposed vessels & machines

船机类别	艘(台)数	施工效率		
		单位	平均	最高
软体排铺设船	15	m ² /艘·日	5 372	10 131
排水板打设船	5	根*/艘·日	1 185	3 900
基床抛石整平船	30	m ² (整平)/艘·日	581	1 620
		m ³ (抛石)/艘·日	2 000	6 000
整平机	10	m ² /艘·日	800	1 400
升降抛石船	20	m ³ /艘·日	2500	3 600
沉箱安装船	10	个**/艘·日	2.76	8
合计	27			

* 每根长度 11 m

** 每个沉箱长 20 m, 宽 17 m, 重约 1 100 t

2) 全部采用两台 GPS 移动站实时测定船位。定位测量数据经处理后, 直接输入安装了专用软件的计算机。设计船位、实际船位、三维定位误差、卫星工作状态及有关施工数据均能直观地以图像和数据在屏幕显示, 提高了定位精度和工效, 部分实现了实时监控和信息化施工管理(图 6)。

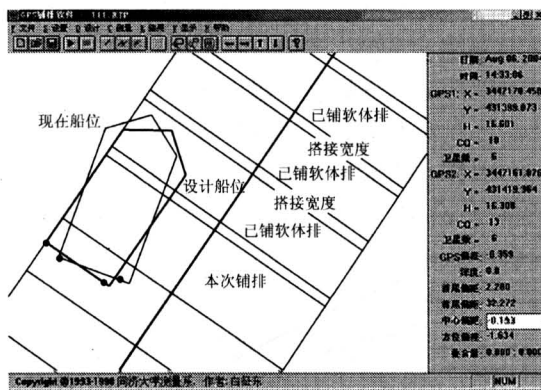


图 6 水上施工定位软件界面图

Fig.6 The interface drawing of construction position software

3) 主要操作均实现了机械化, 集中控制, 生产效率高。各类专用作业船的工艺特点简介如下:

(1) 软体排铺设船(封3图8)。创新地采用了可调倾角的滑板结构, 使在甲板上成型(指充灌砂肋和固定成组预制的联锁块)的排体, 可依靠重力稳定地下滑入水, 减少了波浪水流的影响; 采用本船上配置占地面积小、起重能力适中、钩速快、稳性好的克林吊装卸预加工的土工布卷和压载材料; 利用大型卷筒随船体平移而同步释放排体入水。这些特点使其有别于国内外(如美、荷采用的大型成

卷排体铺放船)的铺设船, 使得材料补给—压载组拼—排体沉放形成连续流水作业。还利用浮标倒锤法测定水下排位的技术, 使铺设质量特别是排体搭接宽度的控制得到有效保障。

本工程形成了土工织物材料选用→排体设计→施工设备→施工工艺→质量控制及检验方法与标准的软体排设计施工成套技术, 现已广泛在国内黄骅港、洋山港等诸多大型工程中推广应用。

(2) 排水板打设船。采用电动震动锤, 垂直钢管将塑料排水板送至设计标高, 然后拨管留板这一基本工艺与陆上软基加固普遍采用的工艺相同。由于本工程工况恶劣且要求施工强度高, 故新建或改造的打设船多采用了在船艏设打设区的结构, 且采用了多台成组打设的方式(2~12台打设架并联)。由于采用GPS测定船位, 使排水板排/列间距可得到精确控制, 打设效率高。

由于本工程区流速大, 砂垫层采用了“砂被”结构, 必须使导管带排水板穿过砂被打设时砂被土工布的破口尽量小, 才能避免充砂流失; 加之加固设计思想是仅对近表层有限厚度的淤泥质土实施排水固结, 塑料排水板长度仅 11 m 左右, 下端未达良好土层, 软土对排水板锚固力小, 拨管时极易产生回带现象。为了确保排水板打设质量, 从而确保加固效果, 施工单位开展了技术攻关, 设计成功了可回收复用, 对砂袋布破损小的专用塑料板桩靴, 并利用牵引定尺排水板入管的引绳作为回带判定的测量工具, 巧妙地解决了这一工艺技术难题。

(3) 基床抛石整平船(封底图9)。水运工程中重力式结构的抛石基床整平施工历来采用潜水员水下作业, 受浪、流影响极大、效率低、质量控制难度高。上世纪 70 年代以来, 多家工程局虽研制过框架式、摇臂式水下整平机, 甚至引进过日本的夯击整平锤, 但终因配套工艺设备研制及控制技术开发等方面的困难, 未能形成实用化的成果。

本工程基床整平工程量大, 浑浊的江水能见度极差, 加上浪高流急, 以高效机械化整平取代潜水作业势在必行。

开发的坐底式基床抛石整平船(见封底图9)依靠两侧的船体(称片体)直接坐在护底软体排上, 靠调节压载水控制片体的接地压力, 以适应地基的低承载力。在船艏的空腔内靠两台卷扬机水平移动的刮板推平由克林吊抓斗抛入的块石; 支撑刮板的两根轨道梁各依靠固定在片体上的两台长行程

液压油缸悬吊并调平。因此，即使地基表面有一定坡度或凹凸不平，船体允许随之倾斜，而刮板的刀口仍可沿水平面移动。

坐底式抛石整平船因坐底而具有良好的抗浪稳定性，为二期工程建造的第二条整平船在10级以下大风中仍可就地抗浪；它使基床抛石和基床整平两道工序合并施工，单船综合效率可高达日完成90延米的基床建造；直接对通常规格（1~100 kg）的块石整平，表面不平整度可控制在 ± 5 cm以内，精度和基床密实度均优于传统的人工整平。其抗浪能力、施工效率和质量均优于日本的夯实整平机、水下推土机和水下整平机，在中国水运工程史上第一次真正实现了整平作业的机械化施工。

二期工程开发的基床抛石整平船（封底图10）的整平工艺与坐底式相同，但船体采用了平台式结构。整平作业及避风时依靠4条巨大的液压支腿桩将船体升至水面以上以减少波浪水流荷载，支腿下端设计了桩靴以减少整个结构的接地压力，保护软体排。这也是世界上独具特色的新型整平船，在二期工程SIIB标段施工中发挥了关键作用。

（4）基床整平机。这是参考日本的步履式水下整平机自主设计制造的自动化整平作业机械。此设备在已抛石的基床上依靠两组共8条液压支腿交替支承设备自重并完成纵横移位，除利用液压驱动的卷扬机牵引推耙式刮刀完成整平外，还可用其后方跟进的压辊对耙后床面进行碾压。整平作业效率高、质量好。进退场及检修时需起重船辅助及对前道抛石工序要求不能有太大超高，但较之抛石整平船又具有对水深及基床宽度适应能力强的优点。

整平船和整平机在长江口工程中的成功开发和应用，使我国重力式水工结构的抛石基床整平告别了依赖潜水作业的繁重、低效时代，跨入了机械化作业的新时代。

（5）升降式料斗抛石船。这是为提高堤坝结构的护肩、坡脚棱体大块石抛填作业效率和质量而组织研制的专用料斗抛石船（封底图11）。

该船的工艺特点是依靠桥式抓斗机从石料运输船卸料堆存于甲板上储料仓（也可直接抛至另一舷侧水中）；装载机铲运块石倾入舷侧容积达 20 m^3 的巨型料斗中；料斗降至水下近底高程，遥控倾翻石料至设计位置；配备了先进的抛投块石三维测深成图监控系统，一次抛投量大，定量定位抛石不受水深及水流影响，抛填质量好。

该船在长江口二期工程的成功使用，改写了水运工程水下抛石只能依靠人工、网兜、反铲等常规工艺的历史。

（6）沉箱安装船（封底图12）。传统矩形或圆形（指水平截面）沉箱安装已有多种成熟工艺。但均为依靠大型起重船、锚泊驳船或直接用锚缆定位。本工程除要求安装速度快，工况条件更差外，由于沉箱构件外形呈圆弧状，使缆索定位和箱顶作业均极为困难。

为适应工程的特殊条件，为二期工程研制了这艘世界上独一无二的专用安装船。

该船采用半潜结构、坐底施工。其工艺特点是在单侧舷外设置了3组6根水平外伸距离可调，垂直方向可伸缩的液压导杆。沉箱由拖轮浮运拖至已坐底定位的安装船近旁后，改由安装船上缆索牵引至半圆沉箱趾部抵靠在2根导杆上。用安装船上的缆索沿舷侧牵引调整沉箱沿堤轴线的位置，调节导杆外伸距可使沉箱平面位置精确定位。对沉箱注水沉放时，导杆可同步下伸，从而保证了沉箱垂直下沉就位。3组导杆可供3个沉箱同时在船舷进行调位、注水及沉放的流水作业。

独创的新颖半圆沉箱安装船解决了大型半圆沉箱在长江口安装的诸多技术难题，定位精度高，已创下一个低潮时安装沉箱4个的高记录。

4.4.3 多彩的工艺创新 在治理工程中提出了“向创新的工艺要质量、要效率、保安全，以创新的工艺创企业经济效益”的口号。各施工企业为本工程的需要开发新工艺、研制新设备已成为自觉的需求。据不完全统计，二期工程中各施工单位为建造专用船舶而投入的资金高达4亿多元。施工企业靠工艺和设备的高起点创新，实现了超常规的高效率，实现了水上作业天的高利用率，在完成本工程的同时即已获得了较丰厚的回报，并部分解决了困扰国有大型水运工程施工企业多年的老旧设备更新难题，增强了企业的后劲，走上了依靠技术进步壮大企业实力的良性发展道路。

因此，本工程中除水上各主要工序全部采用了新型大型专用作业船施工外，工艺改革、技术创新不胜枚举。如：

土工布加工线上采用了随拼缝工序同步输送半成品排体布的流水作业新工艺，减轻了缝制劳动强度，提高了制排工效；

开发了双层充砂袋加上覆反滤无纺布一次预加

工,水上沉袋、充砂、敷设无纺布复合施工,一次成型的新工艺,不仅效率提高,还解决了无纺布自水面上沉放铺设易漂浮的难题;

沉箱预制场采用了步进式液压装置顶推沉箱纵横移的新工艺,简洁、稳妥、劳动强度低,取消了地锚、卷扬牵引系统等传统大临设施;

开发应用了多种新颖的专用吊具,具有方便、实用的特点。

5 结语

长江口深水航道治理这一跨世纪的伟大工程,向我们提出了科研、监测、设计、施工管理方面一系列全新的课题。在交通部的指导和大力支持下,依靠参建各单位及全体工程技术人员,坚决地走观念更新、技术创新和管理创新之路,取得了一期工程的成功。整治建筑物44个单位工程和疏浚工程6个单位工程全部评为优良,获得了交通部2003年度水运工程质量奖;创出了月建设3 km以上堤坝类水工建筑物的高速度;工程中创造的新结构、新工艺、新设备已被迅速推广到全国;良好的整治效果,8.5 m水深航道的开通为国家创造了巨大的

社会效益。同样依靠走创新之路,我们战胜了二期工程遇到的更加恶劣复杂的工况条件提出的新挑战,也必将会取得更大的成功。

长江口深水航道治理工程的成功实践,标志着我国已经取得了大型河口治理的成套经验,也说明了只有创新才能指引和保障工程走向成功。

参考文献

- [1] 苑耕浩. 大型充砂袋在海港工程中的应用问题[J]. 港口工程, 1997, (6): 1~8
- [2] 范期锦. 长江口南导堤局部堤身下沉的原因及对策[J]. 中国港湾建设, 2003, (3): 1~4
- [3] 范期锦. 长江口深水航道治理工程中斜坡堤护面结构设计的探讨[J]. 中国港湾建设, 2001, (5): 4~8
- [4] 范期锦. 关于导堤结构透水性对整治功能的影响[J]. 中国港湾建设, 2001, (6): 1~4
- [5] 范期锦. 多台大型液压振动锤联动工作的同步性问题[J]. 中国港湾建设, 2003, (2): 1~4
- [6] 范期锦, 李乃扬. 长江口二期工程北导堤局部破坏的原因及对策[J]. 中国港湾建设, 2004, (2): 1~8
- [7] 范期锦. 沿海堤坝工程的合龙施工[J]. 中国港湾建设, 2004, (4): 1~4

The Innovation of the Yangtze Estuary Deepwater Channel Improvement Project

Fan Qijin

(Yangtze Estuary Waterway Construction CO., LTD Shanghai 200003, China)

[Abstract] Depending on technical innovation and strict, scientific management, the unprecedented Yangtze Estuary deepwater channel improvement project has made success under complicated and wicked natural condition. This paper briefly summarizes some new thought, course of action and effect in the designing, construction and management of this great water navigation project.

[Key words] Yangtze Estuary deepwater channel; engineering management; designing; construction