



# 长江口航道整治建筑物 护底软体排结构的优化和运用

周海<sup>1,2</sup>, 陈琳<sup>1</sup>, 王费新<sup>1,2</sup>

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120;

2. 航道疏浚技术交通行业重点实验室, 上海 200120)

**摘要:** 介绍长江口深水航道治理二期工程后, 针对后续监测发现的问题对护底软体排结构进行的优化, 以及优化后的护底软体排在工程中的成功运用。

**关键词:** 护底软体排; 优化; 试验研究

中图分类号: U 658.93

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)12-0173-05

## Improvement and application of bed protection mattress of regulating structure in the Yangtze estuary

ZHOU Hai<sup>1,2</sup>, CHEN Lin<sup>1</sup>, WANG Fei-xin<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. Key Laboratory of Waterway Dredging Technology, Ministry of Transport, PRC, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** After the phase II improvement project of the deep-draft channel of the Yangtze estuary, the bed protection mattress structure was improved to counter the problems encountered during the subsequent investigation. The paper introduces the improvement measures and successful application of the improved bed protection mattress in projects.

**Key words:** bed protection mattress; improvement; experimental research

长江口深水航道治理工程是世界最大的河口整治工程, 工程规模大, 自然条件恶劣, 设计施工面临的众多难题之一便是工程护底。因为整治建筑物大部分堤段地基表层由极易受水流作用而掀扬和运移的粉砂构成, 建筑物的建设必然带来周边流场的变化引起堤侧及堤头冲刷, 这不仅会直接增大工程投资, 严重时还会危及建筑物的安全, 所以工程护底十分重要。而传统的护底结构运用于本工程又有很多不适之处, 为解决上述难题, 工程建设者研制开发了能够有效保护建筑物周边河床稳定和适应河床冲刷变形的护底软体排结构, 即以长管砂肋和混凝土联锁块为压载材料的新型护底软体排, 取得了巨大的成功(图1)。

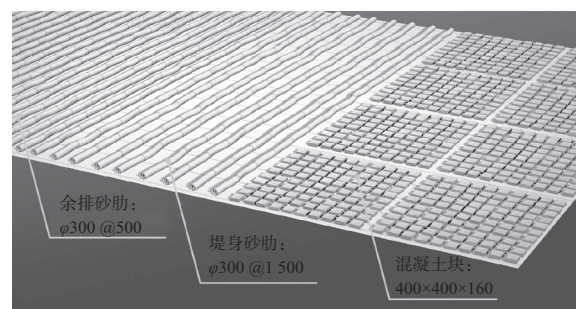


图1 新型护底软体排结构 (单位: mm)

长江口一、二期工程共铺设护底软体排 1 189 万 m<sup>2</sup>。工程实践表明: 采用软体排护底材料来源丰富、可进行批量化生产和运输、铺设机械化程度高, 可大大提高施工效率、节约建设成

收稿日期: 2012-09-27

作者简介: 周海(1957—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事河口航道整治方面研究。

本。施工期及其后的监测表明：护底软体排铺设区域内滩面得到良好的防护，整治建筑物修建引起的局部冲刷均发生在紧靠排边以外的区域，从而有效保证了整治建筑物结构安全。

长江口护底软体排结构的创新和运用成为这项宏大工程成功的关键因素和先决条件。工程建设者并未止步于此，而是坚持对其进行长期跟踪监测，分析其适用性和安全性，并不断对护底结构进行优化和完善。

### 1 排体异常情况

#### 1.1 异常情况的发现

长江口深水航道治理工程采用“动态管理”，工程建设以来对工程区一直进行月度监测。2006年底，在对丁坝坝头区进行加密测量时发现N4丁坝坝头前方超前护底软体排出现异常，具体为：1) 坝头前方超前护底端部两角滩面冲深，排体出现卷曲变形；2) 超前护底软体排内局部有破损。见图2。

#### 1.2 异常段设计概要

N4丁坝位于北导堤内侧中部，一、二期建成总长度2.7 km，其平面位置见图3，坝头段结构设计断面见图4<sup>[1]</sup>。

坝头区原设计泥面高程为-7.1 m（吴淞高程系统，下同），堤顶设计高程0 m，采用抛石斜坡

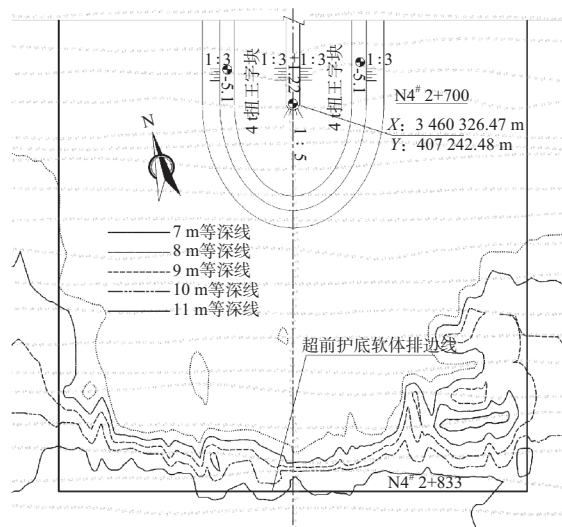
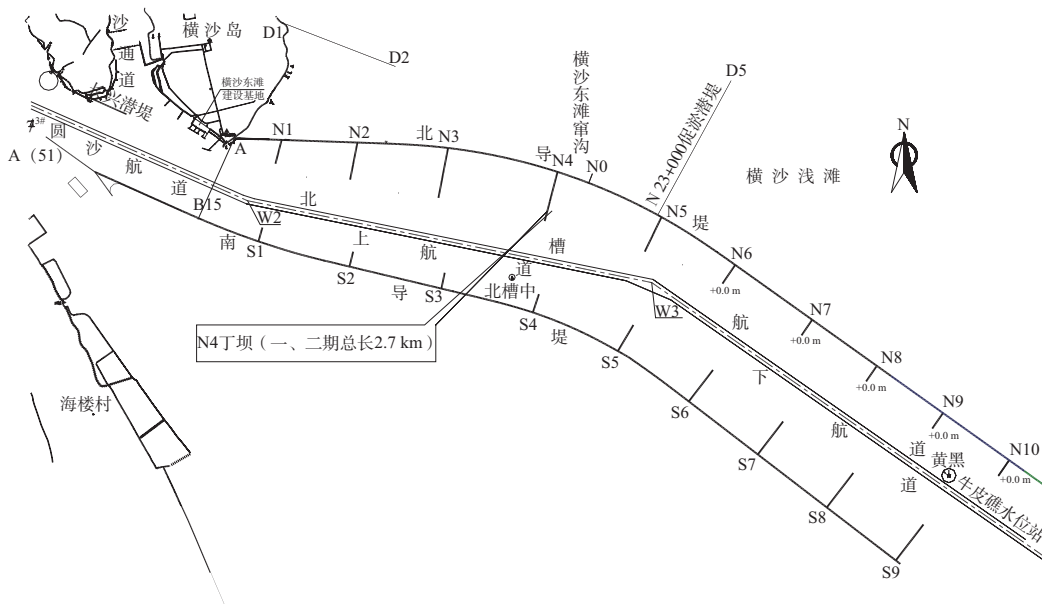


图2 N4丁坝坝头护底软体排排边情况

堤结构，4 t扭王字块体护面，两侧护脚棱体选用重200~400 kg块石。护底采用砂肋堤身排+混凝土连锁块余排组成的混合型软体排软结构：堤身排排布及砂肋袋布选用230 g/m<sup>2</sup>丙纶长丝机织布制作，砂肋 $\phi$  0.3 m@1.5 m；余排排布选用380 g/m<sup>2</sup>针刺复合土工布（230 g/m<sup>2</sup>机织布+150 g/m<sup>2</sup>无纺布针刺复合而成），压载混凝土连锁块尺寸为0.4 m×0.4 m×0.16 m，连锁块间隙为0.1 m。排边2 m范围混凝土块尺寸为0.4 m×0.4 m×0.2 m以增加压重。坝头外超前护底设计长度90 m，采用全混凝土连锁块软体排，排宽160 m。



注：丁坝为二期工程完工时长度。

图3 长江口工程总平面布置

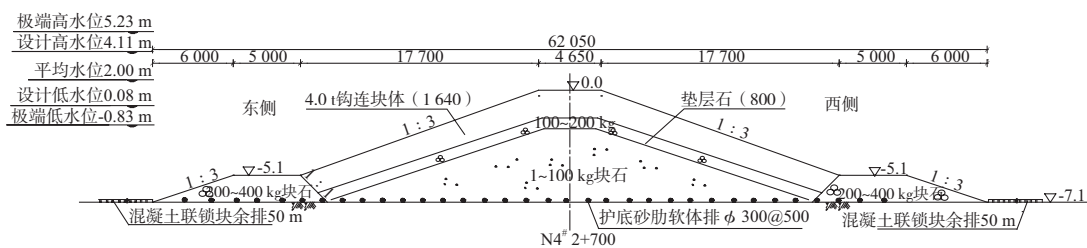


图4 N4丁坝坝头设计断面

### 1.3 异常原因分析

根据加密测量和相关的调查资料分析, N4丁坝坝头出现异常的原因如下:

1) N4丁坝位于北导堤中部, 深水航道W3拐点附近, 且较其它丁坝突出, 坝头正处于涨落潮(尤其是涨潮)顶冲位置, 水流流速较大(数模计算的该处最大垂线平均流速约为1.8 m/s)。在强大涨落潮流的持续作用下, 其端部两角局部排体失稳, 发生掀起或移位, 从而加剧了两角处冲刷。

2) 根据调查, 排体内局部破损多为外力所致。护底软体排上部压载混凝土联锁块间隙相对较大(为0.1 m), 排布偶尔会被渔船抛锚或其它锐器所损。

## 2 护底软体排结构优化试验研究

针对N4丁坝坝头暴露出局部排体边缘失稳以及块体间隙大排布易受损的问题, 开展排体优化的相关试验研究。

### 2.1 压载混凝土联锁块稳定性研究<sup>[2]</sup>

#### 2.1.1 试验目的

分析水流作用下混凝土联锁块软体排压载块体受力情况, 比较不同尺寸混凝土联锁块体稳定性的差异, 探求边缘块体失稳临界流速条件, 探讨影响块体稳定性的主要因素及增加块体稳定性的措施, 为混凝土联锁块软体排结构形式的设计及改进提供重要的依据。

#### 2.1.2 试验方案

试验采用不同尺寸块体与不同量级水流流速进行组合。块体尺寸为3种分别为: 0.4 m × 0.4 m × 0.16 m、0.49 m × 0.49 m × 0.12 m和0.44 m × 0.44 m × 0.16 m。三者之间, 前两种块体单位面积压载混凝土用量基本相当, 块间距分别为0.1 m和0.01 m; 后一种混凝土用量稍多, 块间距为0.06 m。试验流

速取1.5~2.0 m/s间各量级。

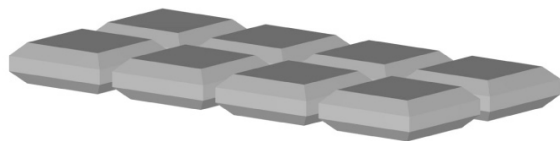
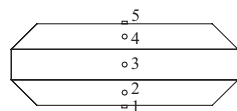


图5 试验混凝土联锁块

试验在50 m × 5 m × 2 m的水槽中进行, 试验内容: 1) 边缘块体在水流作用下抗掀动稳定性试验; 2) 块体整体稳定性试验。边缘块体抗水流掀动稳定性试验采用原型尺寸(即 $\lambda_l=1$ ); 整体稳定性试验根据重力相似准则设计, 长度比尺为 $\lambda_l=5$ , 试验均采用8 × 6块相连。

为测定作用于块体各表面的水压力, 试验过程中在块体的迎流面和上下表面各安装1个水压力传感器, 以测定块体表面的水压强值。传感器安装位置及编号如图6所示。



注: 水流方向垂直纸面向里

图6 传感器安装位置及编号

同时采用Flent软件对块体在水流作用下块体表面承受的附加水压力值进行了数值模拟。将物模实测值与数值模拟结果进行对比, 发现两者基本吻合。

#### 2.1.3 试验结果分析

##### 1) 边缘块体抗水流稳定性试验。

水槽试验采用逐级加大流速方式进行单规格块体试验和3种块体对比试验。试验中记录传感器的水压力值、测量3种块体掀动的临界流速并拍摄掀动过程。

此外, 根据试验块体上测出附加水压力值, 还通过理论计算得出块体的稳定力矩和倾覆力

矩,从而确定3种块体的掀动临界流速。下面以边长0.49 m块体为例说明。

表1 不同组次下3种块体掀动临界流速实测值

块体边长/m	临界流速实测值/(m·s <sup>-1</sup> )			
	1	2	3	4
0.40	1.50	1.70	1.53	1.69
0.49	1.83	1.88	1.83	
0.44	1.88	2.00		

表2 边长0.49 m块体实测附加水压力值

流速v/ (m·s <sup>-1</sup> )	实测附加水压力/kPa				
	1	2	3	4	5
1.52	0.885	0.963	1.636	-0.062	-0.448
1.64	0.998	1.040	1.679	0.211	-0.448
1.69	1.182	1.207	1.819	0.124	-0.328
1.83	1.437	1.398	2.090	-0.381	-0.031
1.88	1.676	1.668	2.435	0.216	0.078

注:流速和附加水压力值均为试验中流速相近组次试验的平均值。

表3 0.49 m块体附加水压力力矩

流速v/(m·s <sup>-1</sup> )	上举力F <sub>L</sub>		拖曳力F <sub>D</sub>		F <sub>1</sub>		F <sub>2</sub>		倾覆力矩M <sub>w</sub> / (N·m)
	F <sub>L</sub> /N	M <sub>L</sub> /(N·m)	F <sub>D</sub> /N	M <sub>D</sub> /(N·m)	F <sub>1</sub> /N	M <sub>1</sub> /(N·m)	F <sub>2</sub> /N	M <sub>2</sub> /(N·m)	
1.52	194	31.9	36.0	2.88	30.0	8.26	-1.9	0.31	43.4
1.64	210	34.6	36.9	2.96	32.4	8.92	6.6	-1.56	45.0
1.69	219	36.2	40.0	3.20	37.6	10.36	3.8	-0.91	48.8
1.83	213	35.2	46.0	3.68	43.5	12.00	-11.8	2.81	53.7
1.88	232	38.3	53.6	4.29	51.9	14.31	6.7	-1.59	55.3

注:稳定力矩为55.37 N·m。

理论计算与试验结果基本一致:①3种块体临界掀动流速值分别为:0.4 m混凝土块体大致在1.65~1.8 m/s,0.49 m块体为1.83~1.95 m/s,0.44 m块体为1.9~2.05 m/s。②上举力是影响边缘块体抗水流稳定性的主要作用力,上举力是由于剪切流中存在的流速梯度分布而产生的一种水压力,表现为块体上下表面附加水压力差。上举力产生的附加水压力力矩为最主要的倾覆力矩,下倒角表面附加水压力所起作用十分有限。

## 2) 块体整体稳定性试验。

试验表明:当水流流速达到一定量级时,第一排排体开始整体掀动翻卷,进而带动后排块体移动;流速再大时,则前面若干排块体(试验中一般为3~4排)翻卷,而后重新形成一种稳定状态;在水深较适合、流速加到很大时,则最终会出现排体整体翻卷滚动。另外,流速分布不均匀时,会出现位于软体排边角的部分排体翻卷失稳的现象。

3种块体临界掀动流速见表4。需要说明的是,模型比尺为1:5,相应的倾覆力矩可能较大,所以与边缘排体抗水流掀动稳定性试验对比时需考虑这方面的因素。

表4 模型块体及原型整体试验临界掀动流速

块体规格/ (m×m×m)	模型临界掀动流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	原型临界掀动流速/ (m·s <sup>-1</sup> )
0.40×0.40×0.16	0.667	1.60
0.49×0.49×0.12	0.780	1.75
0.44×0.44×0.16	0.824	1.90

整体稳定性试验结果表明,边缘块体的稳定是决定护排整体稳定性的重要因素。边缘块体的掀动翻滚将导致混凝土压载排体整体失稳,因此,可以考虑通过一定措施加强边缘块体的稳定性,从而增强软体排的整体稳定性。

试验结果表明:边长0.49 m块体与边长0.44 m块体稳定性相当,且具有单位面积压载混凝土用量较低、块间空隙小的优点,因此可作为混凝土连锁块软体排设计方案进一步优化试验研究方向。

## 2.2 软体排优化现场试验研究

根据室内试验结果,对优化的混凝土连锁块软体排在横沙预制厂进行现场预制、起吊和适应变形能力试验<sup>[3]</sup>,连锁块尺度为0.49 m×0.49 m×0.12 m,连锁块间距为0.01 m。

2007年4—6月间先后进行的3次现场试验表明:优化后混凝土连锁块在预制、脱模、起吊和



沉放方面均是可行的。为了更有利于适应变形和减少混凝土连锁块起吊时块间挤压损坏块体棱角,建议混凝土连锁块块间距由0.01 m优化为0.02 m,厚度仍为0.12 m不变,即块体尺寸为 $0.48\text{ m} \times 0.48\text{ m} \times 0.12\text{ m}$ 。



图7 混凝土连锁块脱模起吊和变形适应能力试验

### 3 护底软体排优化措施

根据试验研究和相关计算结果对护底软体排提出如下改进措施:

1) 为避免排体边缘失稳,增加排边压载的重力。

排体边缘特别是排头边缘因受水流、波浪作用较大,压载块易移动和卷起,应与排体内部压载有区别,建议排体边缘混凝土连锁块尺寸取 $0.48\text{ m} \times 0.48\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 。

2) 针对排体受外力破坏的问题,采取以下3项优化措施。

①减少混凝土连锁块之间的空隙,降低底布暴露面积。

按照软体排单位面积压载重量不变的原则,混凝土连锁块尺寸由原来的 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.16\text{ m}$ (块间距为0.1 m)改为 $0.48\text{ m} \times 0.48\text{ m} \times 0.12\text{ m}$ (块间距为0.02 m),连锁块的覆盖率由64%上升到96%,可有效避免外力对排布的破坏。

②提高护排底布的强度和耐久性。

将护底机织布由原 $230\text{ g/m}^2$ 优化为 $350\text{ g/m}^2$ ,这样在造价仅增加3.6%的情况下,护底强度可提高50%,大大增加护底的安全度。

③改进连锁片的连接方式。

为减少原混凝土连锁块片间距过大的缺陷,混凝土连锁块片边缘块体除与护底加筋带系结外,相邻片边缘块体间也要求系结,从而减小片间距增强护底整体安全性。

### 4 工程效果

为减缓深水航道W3处附近淤积集中、淤积强度高的问题,2009—2010年实施长江口深水航道治理三期工程减淤工程,将包括N4丁坝在内的9条丁坝进行延长,以减少过水断面、增加航道流速,达到减淤的效果。减淤工程丁坝延长段断面结构不变,但护底采用了优化后的护底软体排结构。工程于2010年4月完成,至今已历时2 a。长江口固定断面监测表明:目前工程区排体情况良好,超前护底端部排体完整,位置与铺设时基本一致。N4丁坝沿排边前方及两侧局部冲刷深度仅1~2 m,且目前已趋于稳定。

优化后的护底结构还在长江口南北港分汉口新浏河沙护滩和南沙头通道限流工程以及上游福姜水道双涧沙守护工程中的得到了推广运用,均取得了成功。

### 5 结语

通过创新、实践、监测分析、优化、再实践和再优化的不断循环,我国在护底软体排设计和施工方面已达到了相当高的水平,能较好地满足工程建设需要。但围绕“冲刷-防护”这一主题还有许多相关问题需要探索和研究,比如:冲刷深度和范围预测、护底排体长度计算、新型护底结构研究等,笔者将致力于进行更深层次更广范围的理论分析和试验研究。

### 参考文献:

- [1] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 长江口深水航道二期工程整治建筑物工程N1~N4丁坝续建工程施工图设计[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2003.
- [2] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 混凝土连锁块软体排压载块体抗水流掀动模型研究[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2007.
- [3] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 改进型混凝土连锁块预制起调现场试验报告[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2007.

( 本文编辑 武亚庆 )