

· 航道及通航建筑物 ·



## 三角形沉箱新结构研究

马兴华, 陈喆, 周海

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 结合长江南京以下深水航道建设工程一期工程结构设计投标, 研究开发了三角形沉箱这一新型沉箱结构形式, 提出了结构设计方法。研究表明, 三角形沉箱采用与水平面夹角不大于 $60^\circ$ 的侧板可显著提高抗倾稳定性、抗滑稳定性, 减小基底应力; 具有斜坡堤无立波效应、承受波浪力小、基底应力小、对地基承载力要求不高的优点, 又有重力式结构堤石料用量少、预制安装施工效率高的优点, 可用于防波堤、防沙堤、整治建筑物等堤坝工程。

**关键词:** 三角形沉箱; 沉箱; 防波堤; 防沙堤; 整治建筑物

中图分类号: U 656.1<sup>+</sup>11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0097-06

### On new structure of triangular caisson

MA Xing-hua, CHENG Zhe, ZHOU Hai

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

**Abstract:** Combining with the design bidding Phase 1 of Yangtze River downstream from Nanjing 12.5 m Deep-water Navigation Project, we propose a new structure of triangular caisson and its design method. The study on the new structure indicates that such a triangular caisson can significantly enhance the stability against overturning and sliding and also reduce the foundation pressure if the angle between the side plate and horizontal plane is no more than 60 degrees. Such a structure has not only the advantages of mound breakwater, such as no standing wave effect, little wave pressure, foundation pressure and less restrictive requirements for the ground bearing capacity, but also those of gravity structures, namely the usage of fewer rocks and high efficiency of installing prefabricated components. To sum up, the new structure of triangular caisson can be applied to breakwater, sand-control dam and regulating structures, etc.

**Keywords:** triangular caisson; caisson; breakwater; sand control dam; regulating structure

防波堤、防沙堤、整治建筑物等堤坝工程中常用的沉箱结构形式主要有矩形沉箱、圆形沉箱、削角胸墙沉箱、开孔沉箱等<sup>[1]</sup>, 其共同特点是属于重力式结构, 依靠沉箱自重和回填料重力抵御波浪作用, 维持结构整体稳定, 承受波浪能力强, 堤坝自重大, 基底应力大, 对地基承载力要求高, 通常需要抛石基床。矩形沉箱、圆形沉箱迎浪侧为直墙, 存在立波效应; 波浪力大, 存在抗倾稳定问题和水平抗滑稳定问题, 需要一定的宽度。

削角胸墙沉箱通过削角减小水平波浪力, 但由于削角高度占总高度的比例有限, 仍存在一定的立波效应, 波浪力仍然较大, 改善有限。另外, 日本开发了梯形沉箱<sup>[2]</sup>, 梯形沉箱具有一定的顶宽, 横断面为梯形, 侧面与水平面交角一般大于 $70^\circ$ , 目的是利用波浪力的竖向分力, 提高抗浪稳定性, 但由于侧面与水平面交角过大, 其提高抗浪稳定性的作用较为有限, 且顶宽与底宽之比较大, 基底应力仍基本与堤身高度成线形关系, 基底应力

收稿日期: 2014-02-22

作者简介: 马兴华 (1970—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事港口航道工程设计研究。

仍然较大，在软土地基上无法采用，在中等承载力地基上也需要较厚的抛石基床，因此没有得到推广应用。

### 1 三角形沉箱新结构的提出

长江南京以下 12.5 m 深水航道建设工程一期工程（简称本工程）整治建筑物主要采用顺堤和齿坝，具有以下特点：里程长，工程量大，建设周期短，施工强度大；功能为水流控导，无通行要求；设计波浪小，50 a 一遇  $H_{1\%} = 2.44$  m；堤身高度 3 ~ 8 m，属于小 ~ 中等堤高；当地石料匮乏、砂源丰富。

斜坡堤的特点是材料用量以沙石料为主。本工程整治建筑物结构若全部采用抛石斜坡堤，则石料需求量将十分巨大（近 500 万  $m^3$ ），而工程区域附近无采石场，供给压力十分巨大，施工进度和成本势必受产地供给能力和市场严重制约。对于堤高较大的堤段，采用袋装砂斜坡堤是技术可行、经济合理的，但对于堤高较小的堤段，扣除护面结构后，堤心断面面积很小，经济优势有限。

重力式结构堤的特点是石料用量少，工厂化预制、现场安装，机械化程度高，施工效率高，对于减少本工程的石料总量和顺利实施具有重要意义，因此，应作为结构优选和优化考虑方向。根据天津地区、长江口地区经验，现有重力式结构中半圆型堤<sup>[3-4]</sup>（半圆形构件、半圆形沉箱）最适合本工程，该结构承受波浪力作用小且指向圆心，抗滑稳定性好；整体结构重力较轻，外形美观。但设计计算表明，本工程设计波浪小，若采用半圆体结构，则稳定系数过大，经济优势难以体现。

基于以上分析，在长江南京以下深水航道建设工程一期工程结构设计投标阶段，针对无通行要求、设计波浪小、堤身高度小 ~ 中等、当地石料匮乏、砂源丰富的特点，借鉴斜坡堤、削角直立堤和半圆型堤的优点，研究提出了三角形沉箱这一新型结构形式<sup>[5]</sup>。

## 2 三角形沉箱结构设计计算

### 2.1 结构组成<sup>[5]</sup>

三角形沉箱由侧板、底板、两端的封板整体连接成箱体结构并充填回填料形成，两侧侧板之间（沉箱顶部）按节点构造连接，横断面呈近似三角形，侧板与底板的夹角不大于  $60^\circ$ ，不小于  $30^\circ$ ，三角形沉箱整体近似呈三角形棱柱体。

### 2.2 沉箱顶宽

顶宽根据结构构造需要确定，一般取 0.4 ~ 1 m。

### 2.3 侧板与底板夹角<sup>[5]</sup>

侧板提高抗倾稳定性、抗滑稳定性的机理如下：1) 由于侧板与水平面夹角不大于  $60^\circ$ ，在波浪作用下，波浪水流沿倾斜的侧板上爬甚至越过堤顶，从而基本避免了立波效应（坡度越缓、立波效应越小），大大减小了作用在沉箱上的波浪力。2) 由于波浪力作用的方向是与侧板垂直的，其竖向分力为对沉箱稳定有利的力：当侧板与水平面的夹角不大于  $45^\circ$  时，其波浪力的合力作用线始终指向沉箱底板以内，见图 1；波浪力对沉箱抗倾稳定是有利的，波浪力的竖向分力较大，波浪力对沉箱抗滑稳定的有利作用较大；当侧板与水平面的夹角  $45^\circ \sim 60^\circ$  时，其波浪力的合力作用线基本指向沉箱底面—背浪侧趾附近，波浪力对沉箱抗倾稳定的影响很小，波浪力的竖向分力减小，对沉箱抗滑的有利作用减小，见图 2；当侧板与水平面的夹角大于  $60^\circ$  时，其波浪力的合力作用线指向沉箱底板以外，波浪力对沉箱的抗倾稳定是不利的，波浪的竖向分力很小，对沉箱抗滑的有利作用很小。

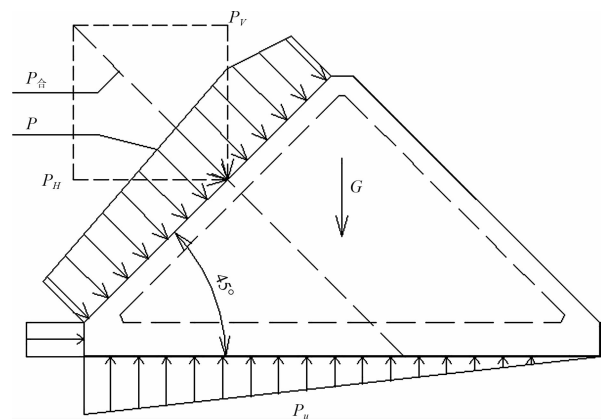


图 1 侧板与水平面夹角  $45^\circ$  时波压力

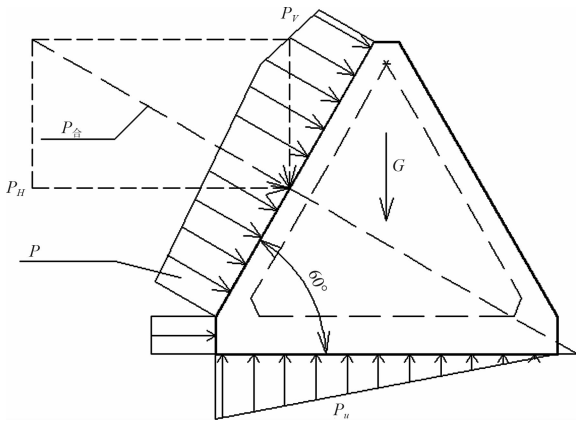


图2 侧板与水平面夹角60°时波压力

根据以上机理分析,侧板与底板夹角主要根据波高和堤身高度的对比关系,经抗倾、抗滑稳定计算确定。一般当堤前波高相对于堤高较小时,侧板与底板夹角可接近于60°,当堤前波高相对于堤高较大、但 $H_{1\%}$ 小于0.6倍水深时,侧板与底板夹角宜接近于45°,当堤前波高很大、 $H_{1\%}$ 接近于破碎波时,侧板与底板夹角宜不大于45°。

#### 2.4 施工工艺及单件质量

单件质量主要根据预制及出运条件、施工作业水深条件、安装工艺及设备条件确定。参照长江口深水航道治理工程半圆型堤施工经验,采用工厂预制、方驳出运、起重船安装工艺,单个沉箱安装质量一般控制在200 t以下比较合适,水深条件较好时,可放大到不超过500 t。单件长度不宜超过10 m。

#### 2.5 计算和验算

##### 1) 波压力计算。

三角形沉箱波压力分布与半圆型堤有一定的相似性,均存在波浪力水平分力、竖向分力、相位修正、角度修正问题,但立波效应(坡度越缓、立波效应越小)明显小于半圆型堤,所承受的波浪压力比半圆型堤更小一些。波压力暂参照JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》<sup>[1]</sup>中“附录J半圆型堤防波堤波压力计算”中相关公式计算(第1步计算直立堤波压力,第2步相位修正,第3步角度修正)是可行的和偏于安全的,精确的波压力计算方法有待后续进一步研究深化。

##### 2) 水流力、剩余水压力计算。

对于流速较大的堤坝,应考虑水流力作用,水流力按JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》<sup>[6]</sup>计算。对于两侧存在显著水位差的堤坝,应考虑两侧水位差引起的剩余水压力。

##### 3) 抗倾稳定性验算。

由于坡面上的波峰波压力的竖向分力对抗倾是有利的,与直立式沉箱明显不同,而与半圆型堤相似,抗倾稳定性可参照JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》<sup>[1]</sup>中半圆型堤抗倾稳定性公式验算:

$$\gamma_o(\gamma_p M_{PH} + \gamma_u M_u - \gamma_v M_{PV}) \leq \frac{1}{\gamma_d} \gamma_G M_G \quad (1)$$

式中: $\gamma_o$ 为结构重要性系数,一、二、三级分别取1.1、1.0和0.9; $\gamma_p$ 、 $\gamma_v$ 、 $\gamma_u$ 分别为水平波浪力分项系数、竖向波浪力分项系数、波浪浮托力分项系数,持久组合取1.25,短暂组合取1.2; $\gamma_G$ 为自重分项系数,取1.0; $\gamma_d$ 为结构系数,取1.35; $M_{PH}$ 为波峰作用在坡面上的波浪力的水平向分力标准值对后趾的倾覆力矩; $M_{PV}$ 为波峰作用在坡面上的波浪力的竖向分力标准值对后趾的稳定力矩; $M_u$ 为作用在底面上的波浪浮托力标准值对后趾的倾覆力矩; $M_G$ 为梯形块扣除浮力后的有效自重标准值对后趾的稳定力矩。

由于侧板与水平面的夹角小于60°,波峰作用在坡面上的波浪力的合力作用线指向三角形沉箱底面—背浪侧趾附近, $\gamma_p M_{PH} - \gamma_v M_{PV} < 0$ ,倾覆力矩不超过波浪浮托力引起的力矩 $\gamma_u M_u$ ,因此,考虑有效自重引起的稳定力矩后一般不存在抗倾失稳问题。

##### 4) 抗滑稳定性验算。

由于侧板上的波峰波压力的竖向分力对抗滑是有利的,与直立式沉箱明显不同,而与半圆型堤相似,抗滑稳定性可参照JTS 154-1—2011《防波堤设计与施工规范》<sup>[1]</sup>中半圆型堤抗滑稳定性公式验算:

$$\gamma_o(\gamma_p P_H - \gamma_v P_v f) \leq (\gamma_G G - \gamma_u P_u) f \quad (2)$$

式中: $P_H$ 为波峰作用在坡面上的波浪力的水平向分力标准值; $P_v$ 为波峰作用在坡面上的波浪力的

竖向分力标准值； $P_u$ 为作用在底面上的波浪浮托力标准值； $G$ 为三角形沉箱扣除浮力后的有效自重标准值； $f$ 为三角形沉箱与基床的摩擦系数。

5) 整体稳定性验算。

参照 JTS 154-1—2011 《防波堤设计与施工规范》<sup>[1]</sup>对半圆形堤整体稳定性验算的要求，应计入波浪力作用。

6) 基底应力计算和地基承载力验算。

三角形沉箱基底应力分布与直立堤有所不同，须考虑波浪力引起的竖向分力，不存在  $\xi \leq B/3$  情况，参照 JTS 154-1—2011 《防波堤设计与施工规范》<sup>[1]</sup>中直立堤公式建立以下公式：

$$\sigma_{\max} \text{ 或 } \sigma_{\min} = \frac{G'}{B} \left( 1 \pm \frac{6e}{B} \right) \quad (3)$$

$$G' = G + P_v - P_u \quad (4)$$

$$e = \frac{B}{2} - \xi \quad (5)$$

$$\xi = \frac{(M_G + M_{PV}) - (M_{PH} + M_u)}{G'} \quad (6)$$

地基承载力可按《港口工程地基规范》验算。

2.6 结构构造及计算

结构构造可参照矩形沉箱。为减少三角形沉箱规格，在滩面水深变化 1 m 范围内可通过在沉箱顶端设置 0 ~ 1 m 的挡板来适应地形变化。

侧板厚度及配筋主要根据使用期波浪力计算确定，底板厚度及配筋主要根据使用期波浪力、填土作用和施工期吊装作用计算确定，封板厚度及配筋主要根据挡土作用和构造需要确定。

3 三角形沉箱主要特点

1) 与水平面夹角不大于 60°的侧板基本避免了立波效应，波浪力的竖向分力对沉箱稳定有利，从而显著提高了抗倾稳定性、抗滑稳定性。

2) 基底应力小且均匀、整体稳定性好，对地基承载力要求不高。①三角形沉箱基本无顶宽，基底应力分布宽度大，且封板与侧板、底板连接形成空间结构，基底应力分布近似刚体，自重作用下基底应力很小（基本为  $\rho g H/2$ ，为矩形沉箱  $\rho g H$  的 50%），由于波浪力的合力作用线指向沉箱

底板中部附近，波浪作用下的基底应力也很小且较为均匀，比直立式沉箱的基底应力显著减小，对于中等承载力的地基，可以减小甚至不设抛石基床，对于软土地基，设置一定厚度的抛石基床后就可适应；②由于基底应力很小且较为均匀，三角形沉箱的整体稳定性也得到提高。

另外，三角形沉箱同样具有重力式结构堤石料用量少、预制现场安装、机械化程度高、施工效率高的优点。

4 本工程三角形沉箱结构方案<sup>[5]</sup>

4.1 设计条件

本工程水动力条件具有潮汐河口特点，受径流、潮汐双重作用。潜堤堤头、齿坝坝头等重要结构的设计波浪重现期采用 50 a 一遇，设计水位（1985 国家高程基准）为极端高水位 4.61 m，设计高水位 2.76 m，平均水位 0.80 m，设计低水位 -1.42 m，整治水位 1.00 m。设计波要素见表 1。

表 1 50 a 一遇设计波要素

位置	波向	$H_{1\%}/m$	周期 $T/s$
C 型沉箱	NW ~ NNW	1.61	5.20
D 型、E 型沉箱	NW ~ NNW	2.44	5.20

4.2 结构方案

1) 沉箱顶宽。本工程整治建筑物的功能为水流控导，对堤顶宽度没有要求，因此，顶宽主要根据结构构造需要确定，取 0.4 m。

2) 沉箱侧板与底板交角（侧板坡度）。C 型沉箱的堤前波高水深比接近于 0.6，侧板与底板夹角宜不大于 45°，取 45°，D 型、E 型沉箱也取 45°。

3) 构件长度、质量及施工工艺。根据本工程施工作业水深条件，参照长江口深水航道治理工程半圆型堤施工经验，采用工厂预制、方驳出运、起重船安装工艺，单个沉箱安装质量控制在 200 t 以下比较合适。通过计算，C 型三角形沉箱长度为 10 m，D 型三角形沉箱长度为 4 m，E 型三角形沉箱长度为 4 m。

4) 沉箱结构构造及尺度。沉箱由底板、侧板

和端头封板 3 部分组成, 侧板上预留灌砂孔。沉箱为预制厂预制完成, 内部灌填砂。C 型沉箱高度 3 m, 侧板厚度 250 mm, 两端封板厚度 200 mm, 单节长 10 m, 空箱质量 120 t, 灌砂后质量 200 t。D 型沉箱高度 5 m, 侧板厚度 350 mm, 两端封板厚度 200 mm, 单节长 4 m, 空箱质量 115 t, 灌砂

后质量 200 t。E 型沉箱高度 7.5 m, 侧板厚度 350 mm, 两端封板厚度 200 mm, 单节长 4 m, 空箱质量 186 t, 灌砂后质量 402 t。

5) 基床及护底。沉箱下设置 0.5 m 厚 10 ~ 60 kg 块石垫层, 两侧坡脚采用 5 m 宽 300 ~ 500 kg 抛石护底。

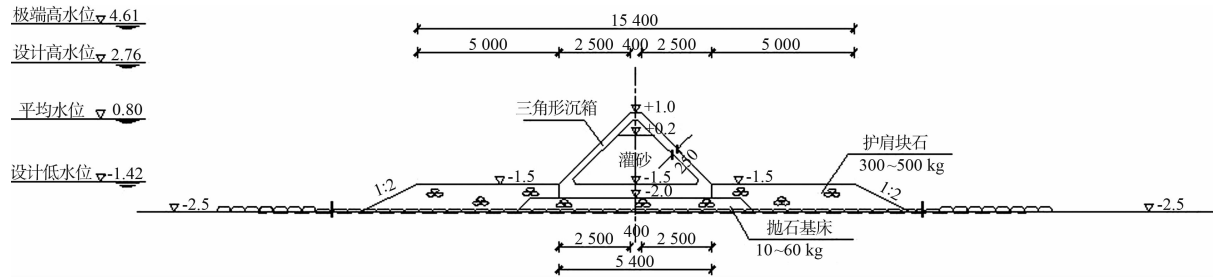


图 3 C 型 (堤高 3.5 m) 三角形沉箱结构断面

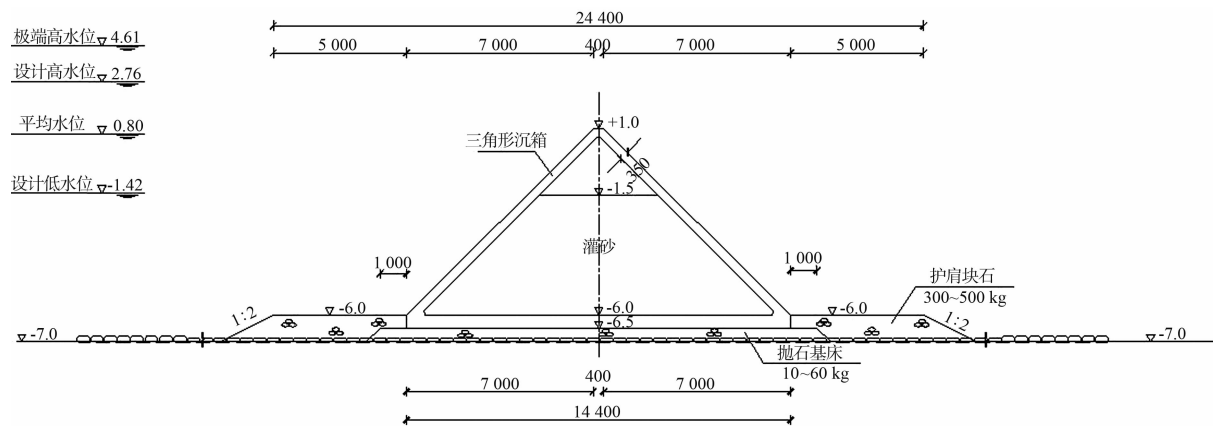
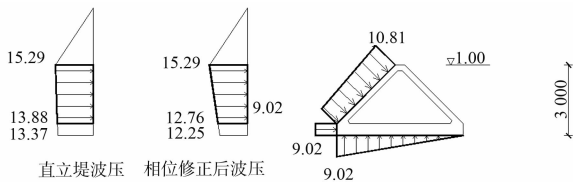


图 4 E 型 (堤高 8.0 m) 三角形沉箱结构断面

### 4.3 结构计算

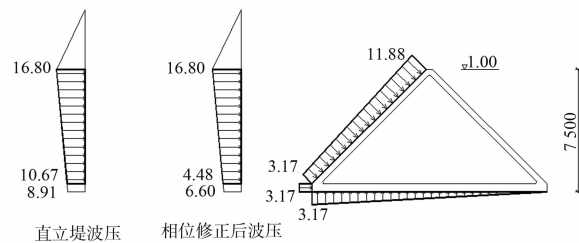
对于淹没堤坝, 需要对不同水位条件下的稳定性进行验算。计算表明, 计算水位 1.0 m 时的波浪作用对抗倾抗滑稳定性最为不利。

1) 波压力计算见图 5。



注: 计算水位为最不利水位 1.0 m, 计算波高  $H_{1\%} = 1.61$  m。

a) C 型沉箱



注: 计算水位为最不利水位 1.00 m, 计算波高  $H_{1\%} = 2.44$  m。

b) E 型沉箱

图 5 波浪力、波浪浮托力分布 (单位: kPa)

2) 抗滑、抗倾稳定计算。沉箱与联锁块的摩擦系数设计值取 0.55, 联锁块与地基的摩擦系数设计值取 0.3。验算结果见表 2。

表2 三角形沉箱堤抗倾、抗滑稳定计算结果

结构形式	抗倾稳定计算		抗滑稳定性			
	稳定力矩设计值/ (kN·m)	倾覆力矩设计值/ (kN·m)	沉箱与联锁块		联锁块与地基	
			抗滑力设计值/kN	滑动力设计值/kN	抗滑力设计值/kN	滑动力设计值/kN
C型	206.50	39.10	40.04	19.59	30.68	27.33
D型	812.96	38.97	105.10	33.59	72.39	48.80
E型	2 572.43	0	249.59	31.62	159.72	48.08

从计算结果可得出：①抗倾稳定性均有很大富余，说明三角形沉箱一般不存在抗倾问题。②抗滑稳定性。堤高3.5 m时45°夹角刚好可以充分发挥该结构的稳定性，堤高大于3.5 m时45°夹角的稳定性富余较大，而且堤高越高富余越大，说明提前波浪相对于堤高较小时可采用更陡一些的角度。后续可通过波浪断面模型试验验证波浪力和波浪作用下的稳定性，在此基础上优化具体的结构尺度，特别是侧板的坡度，进一步提高其经济性。

3) 整体稳定性计算。经计算，三角形沉箱堤整体稳定系数与斜坡堤相当，满足规范要求。

4) 基底应力计算和地基承载力验算。工程区表层主要为粉细砂，局部为粉土、淤泥质粉质黏土，地基承载力特征值为55~100 kPa。经计算，设计低水位时基底应力平均值C型三角形沉箱为36.6 kPa，D型沉箱为40.5 kPa，E型沉箱为42.8 kPa，均不超过地基承载力，因此，本工程三角型沉箱基床只考虑构造需要，设0.5 m厚10~60 kg块石垫层。

#### 4.4 经济性比较

对三角形沉箱堤和抛石斜坡堤、袋装砂斜坡堤、半圆形沉箱堤等其他堤型的断面工程造价进行了比较，结果表明，对于本工程，大部分情况下三角形沉箱堤均具有一定的经济优势，但堤高8 m时略高于半圆形沉箱堤，与三角形沉箱堤结构有所富余有关。

表3 断面工程造价比较

堤身高度/m	造价/(万元·m <sup>-1</sup> )			
	抛石斜坡堤	袋装砂斜坡堤	半圆形沉箱堤	三角形沉箱堤
3.5	1.57	1.53		1.40
5.5	2.75	2.64	2.86	2.66
8.0	4.22	4.02	3.39	3.80

#### 5 结语

本文针对长江南京以下深水航道建设工程一期工程整治建筑物无通行要求、设计波浪小、堤身高度小~中等、当地石料匮乏、砂源丰富的特点，借鉴斜坡堤、削角胸墙沉箱和半圆型堤的优点，研究开发了三角形沉箱这一新型沉箱结构形式，研究提出了三角形沉箱的结构设计方法，研究成果可为三角形沉箱在堤坝工程领域应用提供依据。由于三角形沉箱立波效应明显小于半圆型堤，精确的波压力计算方法有待后续进一步研究深化。

三角形沉箱采用与水平面夹角不大于60°的侧板显著提高抗倾稳定性、抗滑稳定性，减小基底应力。具有斜坡堤无立波效应、承受波浪力小，基底应力小且均匀，对地基承载力要求不高，可以适应中等承载力和软土地基等优点；又有重力式结构堤石料用量少、工厂化预制、现场安装、机械化程度高、施工效率高的优点；因而在防波堤、防沙堤、整治建筑物等堤坝工程中具有良好的发展前景。

#### 参考文献：

- [1] JTS 154-1—2011 防波堤设计与施工规范[S].
- [2] 徐光, 谢善文, 李元音. 防波堤的新结构形式[J]. 水运工程, 2001(11): 20-25.
- [3] 王美茹, 谢善文, 贾东华, 等. 半圆型防波堤的设计和应用[J]. 港工技术, 1999(3): 1-6.
- [4] 谢世楞. 半圆形防波堤的设计和研究进展[J]. 中国工程科学, 2000(11): 35-40.
- [5] 周海, 马兴华, 陈喆, 等. 长江南京以下12.5 m深水航道建设工程一期工程B标、C标技术建议书[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2011.
- [6] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].

( 本文编辑 武亚庆)