

# 半圆形防波堤的设计和 research 进展

谢世楞

(中交第一航务工程勘察设计院, 天津 300222)

**[摘要]** 介绍半圆形防波堤和导堤结构在天津港和长江口深水航道治理工程中的设计应用情况, 并对作用在半圆形防波堤上的波浪力计算方法研究以及半圆形防波堤的构造等发展概况作了论述。

**[关键词]** 半圆形防波堤; 设计应用; 波浪力

## 1 概述

半圆形防波堤或河口导堤的堤身为由半圆形拱圈和底板组成的预制钢筋混凝土构件, 堤身坐落在抛石基床上。这种新型结构是 20 世纪 90 年代初由日本开发的, 并在宫崎港建造了长度为 36 m 的防波堤试验段。

半圆形防波堤具有以下优点:

(1) 与传统的直立式防波堤相比, 作用于半圆形防波堤上的波浪力较小, 因此抗滑稳定性好, 堤身断面经济。

(2) 由于作用于半圆形堤面的波浪压力, 其作用方向均通过圆心, 对堤身不产生倾覆力矩, 因此地基应力基本为均布状况, 适合于软基的条件。

(3) 圆拱结构的构件受力性能好。

(4) 半圆形构件全部在陆上预制, 安放于平整好的抛石基床上后, 即可抵御大浪的袭击, 且无现浇混凝土等后续工序, 因此特别适用于自然条件较差的外海地区。

(5) 半圆形构件为自身稳定结构, 堤身内无需填石, 施工简便, 石料用量省。

(6) 对已建好的堤段, 可较方便地把半圆形构件吊起并重新安放就位。

(7) 半圆形防波堤的外形, 在海域中具有较好的景观效果。

在国内, 交通部第一航务工程勘察设计院(现中交第一航务工程勘察设计院, 以下简称一航院)首先于 1995 年 3 月完成了天津港北大防波堤的半圆形防波堤初步设计。随后, 又在天津港南疆第五期围埝的东端设计了 527 m 长的半圆形防波堤, 该堤已于 1997 年 9 月建成。

1996 年 10 月一航院完成了长江口深水航道治理工程半圆形导堤结构的专题研究, 最早为长江口导堤建设推荐了半圆形结构方案。长江口治理的第一期工程中, 南导堤采用半圆形结构的堤段达到 17.5 km, 自 1998 年开始已在大规模建造中。

根据天津、上海两地半圆形防波堤和导堤工程设计的需要, 在物理模型试验成果的基础上, 笔者提出了堤顶淹没情况下半圆形防波堤(潜堤)上波浪作用力的计算方法<sup>[1]</sup>。此外, 一航院还开发了半圆形防波堤上波浪力计算的数学模型<sup>[2]</sup>。结合实际工程设计, 并对半圆形构件的拱圈和底板的开孔等构造问题进行了研究探讨。

## 2 天津港半圆形防波堤

### 2.1 北大防波堤

根据天津港总体布局规划, 将在现有港区的北侧开挖北港池, 建设新的深水泊位。为此, 需在原有北防波堤以北建造一道新的防波堤, 称为北大防波堤, 总长约 6.4 km, 以满足新建泊位的防浪和

**[收稿日期]** 2000-07-10; **修回日期** 2000-07-27

**[作者简介]** 谢世楞(1935-), 男, 浙江慈溪市人, 中国工程院院士, 中交第一航务工程勘察设计院教授级高工, 天津大学教授, 博士生导师

防淤要求。

北大防波堤堤址处海底地形平缓，海底坡度约为 1/1500。防波堤轴线上的深度约为 -1.0 m（自当地理论最低潮面起算，下同）。

海底面下表层为淤泥，层底高程约为 -7 ~ -11 m。该层土的主要物理力学指标如下：重度  $\gamma = 16.5 \text{ kN/m}^2$ ，含水量  $W = 62\%$ ，孔隙比  $\epsilon = 1.7$ ，快剪内摩擦角  $\Phi = 1.1 \sim 1.4^\circ$ ，粘聚力  $C = 3.5 \sim 7.7 \text{ kPa}$ 。

第二层为淤泥质粘土，层底高程为 -12.7 ~ -14.3 m。土壤的主要物理力学指标为  $\gamma = 17.6 \text{ kN/m}^2$ ， $W = 44.8\%$ ， $\epsilon = 1.25$ ， $\Phi = 1.9^\circ$ ， $C = 10.5 \text{ kPa}$ 。

第二层以下为土质较好的亚粘土和亚砂土。

防波堤的设计高水位为 4.30 m，设计低水位为 0.50 m。并采用重现期为 50 年的高潮位作为校核高水位。

根据波浪要素推算，设计高水位时的波高  $H = 3.2 \text{ m}$ ，波浪周期  $T = 8.1 \text{ s}$ ；校核高水位时的波高  $H = 4.1 \text{ m}$ ，周期  $T = 8.1 \text{ s}$ 。由于水深较浅，设计波高均为破碎波高。

对于这座防波堤，在方案设计阶段曾经做过多方案的比选工作。由于当地石料单价高，斜坡堤结构的造价较贵。而传统的混合堤结构，由于自重较大，在软弱地基的条件下，一般需采用打设排水砂井或塑料排水板来进行地基加固处理，才能满足地基强度和稳定性以及沉降等要求。经过计算比较，由于半圆形混合堤结构的自重轻，采用砂垫层和土工布的简单地基处理方法即可满足地基整体稳定性的要求，具有石料省、造价低和施工进度快等明显优点，被确定为 1995 年完成的初步设计中的主要结构方案。

北大防波堤的钢筋混凝土半圆形结构断面如图 1 所示。防波堤的堤顶高程为 5.2 m，半圆形构件的半径为 4.5 m。半圆形拱圈的厚度为 55 cm，底板厚度为 80 cm。底板上开设有  $\phi 24 \text{ cm}$  的泄压孔，拱圈临海一侧设有  $\phi 15 \text{ cm}$  的泄气孔。每个半圆形构件的纵长 4.8 m，重为 176.6 t，采用起重量 200 t 的起重船进行安放。

半圆形防波堤上的波浪作用力采用修正的合田良实公式<sup>[3]</sup>进行计算。半圆形防波堤的设计断面先后由天津港湾工程研究所和大连理工大学在波浪水槽中进行了稳定性验证，并量测了波浪压力。

对于北大防波堤的结构，还考虑了日后在堤的内侧填筑陆域的可能性。

由于建设计划的调整，北大防波堤工程至今尚未实施。

### 2.2 南疆横堤

1996 年确定要在天津港南部港区（南疆）建造第五期围埝，根据北大防波堤的设计经验，其东端 527 m 长的横堤采用了半圆形混合堤的方案。横堤堤址处的海底深度约为 -1.8 m，在堤轴线位置下原有少量抛石，其他自然条件与北大防波堤基本相同，因此断面形式与北大防波堤也相似。半圆形混合堤的堤顶高程为 5.5 m，半圆形构件的半径仍为 4.5 m，抛石基床顶高程为 1.0 m。拱圈厚 55 cm，底板厚 75 cm，其开孔情况与北大防波堤相似。半圆形构件的底宽 10.6 m，纵长减少至 2.5 m 每个构件重 83.2 t，以便利用起重能力较小的工作船舶施工。

南疆横堤于 1997 年 9 月建成，为中国第一座半圆形防波堤。根据计算，横堤的半圆形结构方案可比传统的斜坡式结构方案节省造价 21.4%。

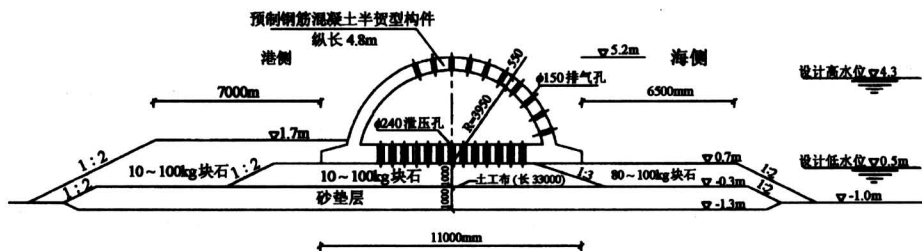


图 1 天津港半圆形防波堤（北大防波堤）断面图

Fig.1 Cross section of semi-circular breakwater at Tianjin Port

### 3 长江口治理工程半圆形导堤

长江口深水航道治理工程计划建造南北两道导堤。1996 年交通部一航院新港工程监理咨询有限公司为该工程完成了半圆形导堤结构专题研究报告，设计了海底面高程分别为 -8.0 和 -4.0 m (自吴淞基准面起算，下同) 的半圆形导堤结构断面。

自 1998 年开始建设的长江口治理第一期工程，南、北导堤的长度分别为 20 和 16.5 km，其中南导堤总共约有 17.5 km 的堤段采用了半圆形结构，分别由两家设计单位设计，以下主要介绍由一航院设计的南导堤东段 (里程号 9+000 至 20+000) 的半圆形导堤结构。

长江口南、北导堤的堤顶高程由总体设计确定为 2.0 m。对于一期工程南导堤东段，根据水深的不同，分别设计了适用于海底面高程为 -2.0 ~ -3.0 m 和 -3.0 ~ -3.5 m 的两种半圆形导堤断面。限于篇幅，以下将主要介绍后一种水深的断面设计情况。对应于校核高水位时的  $H_{1\%} = 5.3$  m,  $T = 7.6$  s; 设计高水位时的  $H_{1\%} = 3.9$  m,  $T = 7.5$  s。  $H_{1\%}$  指波列中累积频率为 1% 的波高,  $T$  为平均波

浪周期。

根据地质勘探结果，南导堤东段海底面下的土层主要为：第一层为灰黄色粉砂，一般厚 3~5 m，标准贯入击数  $N = 2 \sim 4$ ；第二层为灰和灰黄色淤泥质粉质粘土，饱和，呈流塑和软塑状态，一般厚 3~5 m,  $N = 1 \sim 2$ ；其下为灰色淤泥质粘土和粘土，饱和，软塑，厚 15~19 m,  $N = 1 \sim 3$ 。

海底面高程为 -3.0 ~ -3.5 m 的半圆形导堤断面如图 2 所示。应当指出虽然导堤的主要功能是束水导流，但在与波浪的相互作用方面，本质上是与防波堤相同的。

对于海底面高程为 -3.0 ~ -3.5 m 的情况，设计采用半径为 4.0 m 的半圆形构件，构件高 4.5 m，坐落在高程为 -2.5 m 的抛石基床顶面。拱圈厚 75 cm，底板厚 125 cm。半圆形构件的纵长为 4.0 m，每个构件的拱圈外侧设有 3 排  $5\phi 30$  cm 的泄气孔，开孔率为 4.7%；底板上设有 5 排  $9\phi 30$  cm 的泄压孔，开孔率为 11.3%。每个构件重 180 t。半圆形构件底板部位的内、外两侧抛有 100~200 kg 的块石棱体。堤底及堤内侧海底上铺设土工织物与砂肋组成的软体沉排，堤外侧海底上为土工织物与混凝土小方块组成的软体沉排。

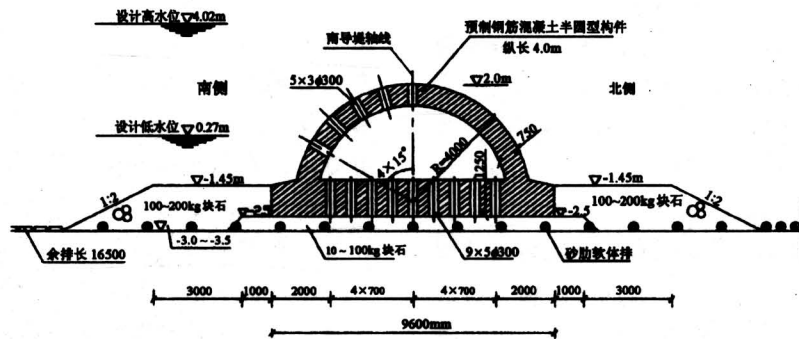


图 2 长江口半圆形导堤断面图

Fig.2 Cross section of semi-circular jetty at Yangtze Estuary

在进行长江口半圆形导堤专题研究时，通过物理模型试验，发现日本通用的修正的合田波压公式不应用于半圆形堤顶淹没 (潜堤) 的情况，提出了淹没情况下半圆形堤的波浪力计算方法。在一期工程南导堤东段半圆形堤的设计中，采用了潜堤经验计算方法、基于 5 阶 Stokes 波的数学模型分析以及物理模型试验等三种方法。三种方法得出的半圆形堤的抗滑安全系数如表 1 所示。

表 1 抗滑安全系数比较表

Table 1 Comparison of safety factor for sliding

水位	不考虑抛石抗力			考虑抛石抗力		
	潜堤经验公式	数模	物模	潜堤经验公式	数模	物模
校核高水位	1.22	1.13	1.17	1.34	1.24	1.29
设计高水位	1.56	1.27	1.60	1.75	1.43	1.80

总的来说, 潜堤经验公式计算结果与物模试验实测波压比较接近。当考虑堤后抛石棱体的抗力后, 校核情况的最小抗滑安全系数大于 1.2, 满足交通部颁布的《防波堤》规范的有关要求。

长江口半圆形导堤施工后, 进一步证明了这种新堤型适用于自然条件较差的海区, 施工进度较快。

## 4 半圆形防波堤上的波浪力

### 4.1 修正的合田良实公式

日本在计算作用于半圆形防波堤上的波浪力时, 主要采用对直立堤的合田良实公式进行修正后的经验公式<sup>[3]</sup>。

第一步, 首先计算作用于与半圆形堤相同水深、相同基床高度和相同堤顶高程的直立堤(或混合堤)上的波浪力。

当波峰作用时, 直立堤上的波浪力主要由波浪压力图形零点在静水面以上的高度  $\eta$ ; 静水面处的波浪压力  $p_1$ ; 以及直立墙底面处的波浪压力  $p_3$  来确定。

$$\eta = 0.75 (1 + \cos \beta) H \lambda_1 \quad (1)$$

$$p_1 = 0.5 (1 + \cos \beta) (\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 \cos^2 \beta) \omega_0 H \quad (2)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1, \quad (3)$$

式中:  $H$  为设计波高 (m);  $\beta$  为波向线与防波堤轴线的法线间的交角 ( $^\circ$ );  $\omega_0$  为海水的重度 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ );  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\alpha_2$  为系数, 对半圆形防波堤  $\lambda_1 = 1$ ,  $\alpha_2 \lambda_2 = 0$ 。

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[ \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \quad (4)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h}{h'} \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right], \quad (5)$$

其中:  $L$  为设计波长 (m);  $h$  为堤前水深 (m);  $h'$  为半圆形构件底面以上的水深 (m)。

第二步, 考虑与直立堤时不同, 波峰作用于半圆形堤面上各点是有相位差的, 因此需进行相位修正。对于半圆形堤:

$$\eta' = \eta \quad (6)$$

$$p'_1 = p_1 \quad (7)$$

$$p'_3 = \lambda_p p_3, \quad (8)$$

式中:  $\lambda_p$ —相位修正系数,

$$\lambda_p = \cos^4(2\pi \Delta l/L), \quad (9)$$

其中  $\Delta l$  为在半圆形堤面上  $p'_1$  与  $p'_3$  作用点间的水平距离,  $p'_1$  作用点即堤面与静水面的交点。

修正后的波压以  $p'(Z)$  表示,  $Z$  为自半圆形构件底面起算的垂直高度。

第三步, 考虑作用于半圆形堤面上的波浪压力, 其方向均应垂直于堤面, 因此还需进行角度修正。经角度修正后的堤面波压为:

$$p(\theta) = p'(Z) \cos \theta, \quad (10)$$

式中:  $\theta$ —波压作用点的圆心角。

对于半圆形堤的底板, 通常开有垂直泄压孔。日本的试验资料表明, 当开孔率达到 10% 以上时, 作用于底板上的波浪浮托力可忽略不计。因此浮托压力

$$p_u = p'_3 \quad \text{当 } \epsilon_b = 0 \quad (11)$$

$$p_u = 0, \quad \text{当 } \epsilon_b \geq 0.1, \quad (12)$$

式中:  $\epsilon_b$ —底板的开孔率。

本节公式一般适用于半圆形堤顶约高于计算水位 1 倍有效波高  $H_s$  时的情况。

### 4.2 堤顶淹没情况下的经验方法

在长江口治理工程半圆形导堤结构专题研究中, 通过规则波和不规则波的模型试验, 表明在潜堤情况下, 第 4.1 节中的计算公式将得出不安全的结果。

大连理工大学在试验中测压的结果, 一方面证实了当底板开孔率超过 10% 时, 作用于底板上、下两侧的波浪压力趋于互相抵消的结论。但是另一方面, 试验表明在波峰作用时, 拱圈里侧作用有方向向外的波浪压力, 其垂直分量的方向是向上的, 对稳定性不利。在物理模型试验成果的基础上, 笔者对淹没情况下的半圆形防波堤, 提出了波浪力的经验计算方法:

(1) 仍采用第 4.1 节中的计算公式, 但根据试验结果, 在拱圈里侧加上内压力

$$p_0 = p_u/2 = p'_3/2 \quad (13)$$

$$(2) \text{ 由试验资料导出新的相位修正系数 } \lambda_{p1}, \quad (14)$$

$$\lambda_{p1} = \cos(2\pi \Delta l/L)$$

$\lambda_{p1}$  将代替式 (9) 的  $\lambda_p$  来计算  $p'_3$ 。

上述潜堤的经验计算方法, 通过不同实验室的 7 项半圆形防波堤试验的验证, 表明计算结果与试验结果符合良好<sup>[1]</sup>。

### 4.3 数学模型分析

对于上述以日本合田良实公式为基础修正的半圆形潜堤的波浪力计算方法, 只能计算波峰作用时临海一侧(外侧)圆拱上的波浪力。为了计算淹没情况下波峰作用时内侧圆拱上的波浪力以及波谷作

用时整个半圆形拱圈上的波浪力, 一航院又开发了数模计算程序<sup>[2]</sup>, 数模计算的结果与物模验证基本相符。

在波浪力的数模中, 假定流体为二维、无粘、无旋、不可压缩, 且不考虑发生破碎的状况。流体满足自由表面的动力学和运动学方程。

采用 5 阶斯托克斯 (Stokes) 波理论得到初始不受干扰情况下自由面上的势函数  $\varphi$  和质点位置  $R$ 。对于半圆形堤面的边界条件, 假设为不穿透条件。

在计算中, 计算域随波浪向前运动而调整。当波浪行近半圆形堤时将逐渐对堤产生影响, 同时波浪也受到反射作用而变形。

为了得出堤面的波压分布, 需知每一时刻势函数的时间变化率和质点速度。在已知自由面上初始条件的  $\varphi$  和  $R$  的情况下, 利用泰勒展开可以求得下一时刻自由面上的  $\varphi$  和  $R$ 。

经过数学推导, 利用数值方法最终可以求得在波浪运动的各时刻 (包括波峰和波谷作用时) 半圆形堤面上的波浪压力分布情况。这种波压分布将用以进行半圆形构件的结构内力分析。

## 5 半圆形防波堤的几个构造问题

半圆形拱圈上的开孔方式, 可为外侧开孔、内侧开孔或内外两侧均开孔。日本宫崎港半圆形防波堤主要采取在拱圈内侧开圆孔的形式, 开孔率达 25%, 其目的是使波峰作用时的部分越顶水体进入半圆形构件的内部空腔, 以减少越浪量和降低堤后波高。为了适当考虑堤的透水性, 在拱圈外侧也开有开孔率为 1% 的圆孔。

在半圆形拱圈外侧开孔的原意是在构件内部形成消能室, 以进一步减小反射和降低波浪力。根据天津港和长江口工程设计的需要, 一航院分别委托了大连理工大学和天津港湾工程研究所在模型试验中研究拱圈和底板的不同开孔率对半圆形防波堤的受力和稳定性的影响。一般来说, 当拱圈外侧开孔率在 5% 左右时, 作用在半圆形构件上的总水平力与不开孔时基本相同。为了增大开孔率, 曾试验过在拱圈外侧开设沿圆弧的长条形孔, 使开孔率达到 22%。试验发现, 在堤顶淹没的情况下, 波浪通过长条形孔进入半圆形空腔后, 腔内水面剧烈振荡, 拱圈后壁受到较大的波浪力, 半圆形堤的稳定性远低于拱圈外侧不开孔时的情况。因此, 在天津港和

长江口两项工程的半圆形堤, 均只在拱圈外侧开设开孔率约 5% 的泄气孔。

由于天津港和长江口地区的含沙量均较大, 因此在设计中考虑了若底板的泄压孔被泥沙堵塞后, 半圆形堤的稳定情况。在模型试验时, 于波浪水槽中同时放置底板开孔与不开孔的两种构件, 结果表明两者的稳定性是相同的。这是因为当底板的泄压孔被堵后, 虽然底板上作用有波浪浮托力, 但作用在拱圈里侧的波压也相应地减少。通过进一步的试验, 完成了江苏省田湾核电站取水渠导堤工程拱圈和底板均不开孔的半圆形结构初步设计。

日本宫崎港半径为 9.8 m 的半圆形构件, 其拱圈和底板是分别预制的, 然后装配连接成整体。内侧拱圈上的圆孔直径 1.4 m, 拱圈采用预应力钢筋混凝土结构。

天津港和长江口的半圆形构件均为整体浇筑的预制钢筋混凝土结构。天津港南疆横堤的半圆形构件由于纵向尺度只有 2.5 m, 所以采用平躺方式 (即圆弧与地面平行) 预制。长江口导堤的半圆形构件均用立式浇筑。

## 6 结语

天津港和长江口工程采用半圆形结构新堤型的概要介绍。在设计过程中, 对淹没情况下半圆形防波堤上的波浪力计算方法作了改进, 并开发了有关的数学模型。对半圆形构件的开孔等构造问题也结合实际工程作了研究探讨。通过两项工程的实践, 进一步证明了半圆形防波堤应用于外海和软弱地基地区的优越性。这种新型结构在今后将会有更大的发展, 譬如, 长江口深水航道治理的二期工程也会再采用一部分半圆形的导堤和丁坝结构。

### 参考文献

- [1] Xie Shileng. Wave forces on submerged semi-circular breakwater and similar Structures [J]. China Ocean Engineering, 1994, 13 (1): 63~72
- [2] Jia Donghua. Study on the interaction of water waves with semi-circular breakwater [J]. China Ocean Engineering, 1999, 13 (1): 73~80
- [3] Tanimoto K, Takahashi S. Japanese experiences on composite breakwaters [A]. Proc. Intern. Workshop on Wave Barriers in Deepwaters, Yokosuka, Japan [C], 1994. 1~22



位下降。

12) 在预制场内, 要将闸身钢筋混凝土浇筑, 固定件预埋, 闸门和启闭机安装、调试等工作全部完成。然后向预制场内灌水, 当水面接近闸身底板顶面时, 靠浮力使闸身整块浮起, 再在底板空箱上放置重物, 调整闸身自重, 使闸身均匀沉下, 再增加压重, 使闸身在水中的有效质量约为 10 t。闸身潜运定位后, 对沉管底面以下压力灌混凝土浆后, 再向空箱内灌水, 吊走空箱上放置的重物。

13) 每隔 4~5 年对门龛内的浮淤进行清理, 可用真空吸泥泵泵出, 每次清理约需 2~3 h。

14) 由于闸身挡水水位差不大, 闸基地下轮廓可不设垂直防渗板桩, 可在岸墙上游侧设防绕渗刺墙。上游护坦和下游消力池都采用加 NNCD-1 水下抗分散剂的混凝土水下浇筑采用自流平方式施

工, 必要时加括平措施。其他设计和施工步骤与浮运沉管方法建淮安立交工程基本相同, 不再赘述。

#### 参考文献

- [1] 孙更生, 郑大同主编. 软土工程与地下工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984. 670~701
- [2] 林宝玉, 吴绍章. 混凝土工程新材料设计与施工 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 18~20, 141~163
- [3] 戴立明. 水下薄层混凝土施工 [J]. 江苏水利, 1999, 9: 24~27
- [4] 胡金全, 顾强生. 黄沙港反拱底板水下修补试验研究 [J]. 江苏水利, 1999, 9: 28~29
- [5] 徐惠亮, 周灿华, 蔡平. 气压沉柜的应用 [J]. 江苏水利, 1998 增刊: 23~25

## The Application of Box Floor as Submerged Camel to Hydraulic Structures Being Constructed

Zhou Junliang

(Water Resource Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

[Abstract] In this paper, the application of box floor as submerged camel to hydraulics structures being constructed, such as sluice gates only temporarily adjusted, water works in the place where the streams being intersected, locks with broad chamber, etc., is introduced. The sites of these structures are to be on a straight stretch where the diverting of the rivers are not permitted and the widths of chambers of them are equal to the river bed.

The concrete of the chamber and the embedded parts of the chamber as well as the gates with their hoist are completed in a yards where they are prefabricated. The chamber is moved in submerged state to the site. These hydraulic structures are cheaper than those that are constructed in dry sites with the diversion works.

[Key words] constructing hydraulic structures; the box floor as submerged camel; derwater construction

(Cont. from p.39)

## Progress in Design and Study of Semi-Circular Breakwaters

Xie Shileng

(China Communications First Design Institute of Navigation Engineering, Tianjin 300222, China)

[Abstract] The design and application of semi-circular breakwaters and estuary jetties at Tianjin Port and in the Deep Water Channel Improvement Project of Yangtze River Estuary are introduced in the present paper. The study of wave forces acting on semi-circular breakwater as well as the development of the structure of semi-circular breakwater are also discussed.

[Key words] semi-circular breakwater; design and application; wave forces