



地基渗流对板桩码头剩余水压力的影响

钱祖宾¹, 沈建霞², 乔婷¹

(1. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225009;

2. 江苏省交通科学研究院股份有限公司, 江苏 南京 210017)

摘要: 剩余水压力是影响板桩码头结构内力和位移的重要荷载, 影响剩余水压力分布的因素主要有板桩两侧的水位变化、地基土层分布、地基土层的渗透性以及桩底土层的渗透性等。通过实例对不同地质条件下的板桩剩余水压力分布进行分析, 以期今后的板桩码头设计提供参考。

关键词: 静水压力; 渗透水压力; 有效水压力; 均质土; 成层土

中图分类号: U 656.1⁺12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)05-0157-05

Influence of foundation seepage to seepage water pressure on sheet pile

QIAN Zu-bin¹, SHEN Jian-xia², QIAO Ting¹

(1. Jiangsu Water Investigation, Design and Research Institute, Yangzhou 225009, China;

2. Jiangsu Transportation Research Institute, Nanjing 210017, China)

Abstract: Water pressure is an important load which influences the stress of sheet pile. The main factors influencing the distribution of foundation seepage water pressure include the water level on both sides of the sheet pile, the distribution and permeability of the foundation, the permeability of the soil under the bottom of the sheet pile, etc. Based on the engineering examples, we analyze the water pressure distribution works on sheet pile under different foundation conditions, to serve as reference for sheet pile design.

Key words: static water pressure; seepage water pressure; effective water pressure; homogeneous soil; layered soil

剩余水压力是指板桩两侧的水压力差, 对板桩码头的结构内力及位移有着较大的影响, 剩余水压力的分布除与板桩两侧的水位变化有关外, 地基土的土层分布、渗透特性、渗流流态以及桩底土层的渗透性能等均会影响到剩余水压力的分布。根据JTS 167-03—2009《板桩码头设计与施工规范》, 剩余水压力分布为: 墙前水位以上呈三角形分布, 墙前水位以下呈矩形分布(图1), 该分布对于桩底土层为不透水土层的情况较为符合, 而当桩底土层为渗透土层时, 在渗透水头作用下, 地基将会产生渗流, 地基渗流引起的水头损失将对剩余水压力的分布产生较大的影响。

1 地基渗流对剩余水压力分布的影响分析

1.1 桩底土层为不透水层

如图2所示, h_0 , h_1 , h_2 分布表示板桩前后水头差、港池水深和板桩入土深度, 当桩底土层为不透水土层时, 由于板桩的隔离作用, 阻断了板桩前后水体的连通, 即使板桩前后存在水头差 h_0 , 也不会发生地基渗流, 板桩两侧水体为静态水体, 板桩两侧的水压力为静水压力, 其分布见图3, a , b 两点静水压力为 $p_a = \rho_w g (h_0 + h_1 + h_2)$ 和 $p_b = \rho_w g (h_1 + h_2)$ 。剩余水压力为板桩两侧水压力差, 水压力分布如图1所示, 墙前水位以上为三角形分布, 墙前水位以下为矩形分布。

收稿日期: 2012-10-16

作者简介: 钱祖宾(1963—), 男, 高级工程师, 从事水工设计工作。

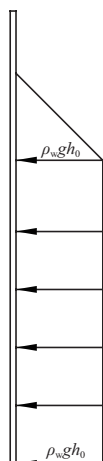


图1 剩余水压力分布

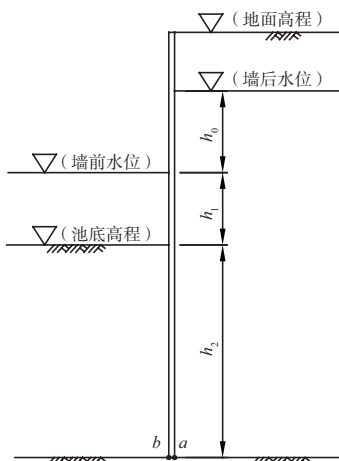


图2 不透水土层

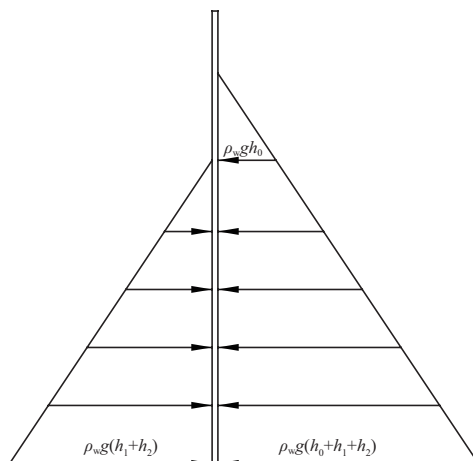


图3 板桩两侧水压分布

1.2 桩底土层为透水土层, 地基土为均质土

如图4所示, 当桩底土层为透水土层时, 在渗透水头 h_0 的作用下, 地基将产生由墙后向墙前的渗流, 地基渗流引起的水头损失将在板桩两侧产生相应的渗透水压力, 取紧邻板桩的流线进行分析, 其渗流路径为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f$, 若忽略 de 段对渗径长度的影响, 则地基渗径总长为 $h_0 + h_1 + 2h_2$, 渗流形式均为垂直渗流。由于板桩后

为由上向下的渗流, 墙后水压力将因渗透水压力而减小, 其有效水压力 p 为墙后的静水压力 p_j 与渗透水压力 p_s 之差; 而板桩前则为由下向上的渗流, 墙前水压力将因渗透水压力而增大, 其有效水压力 p 则为墙前的静水压力 p_j 与渗透水压力 p_s 之和。当地基土为均质土时, 板桩两侧的静水压力和渗透压力均呈直线分布, 见图5。板桩的剩余水压力分布见图6。

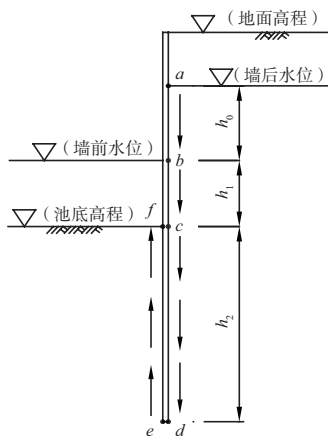


图4 透水土层

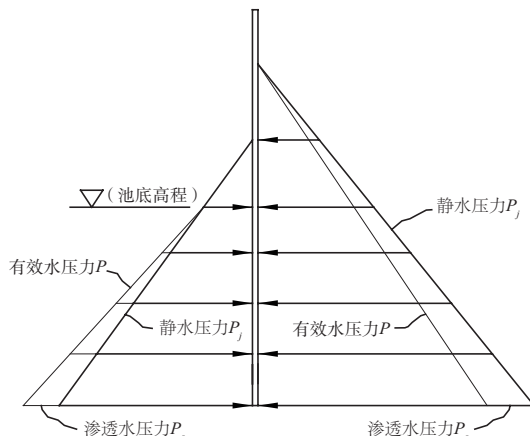


图5 板桩两侧水压力分布

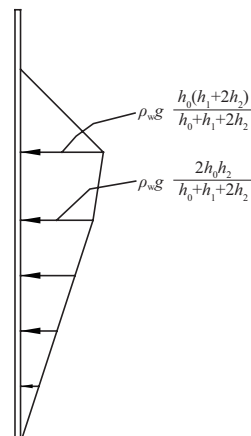


图6 剩余水压力分布

为求解板桩墙剩余水压力, 则必须首先求解图4中 $a \sim f$ 等特征点的静水压力 p_j , 渗透水压力 p_s 以及有效水压力 p , 其中, 墙后各点的静水压力按墙后水位计算, 墙前各点的静水压力按墙前水位计算。由于板桩两侧渗流均为垂直渗流, 且地基土为均质土, 故渗透水压力可根据渗径长度按直线比例法进行计算:

$$a \text{ 点: } \begin{cases} p_j = p_s = 0 \\ p_a = p_j - p_s = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$b \text{ 点: } \begin{cases} p_j = \rho_w g h_0 \\ p_s = \rho_w g \frac{h_0}{h_0 + h_1 + 2h_2} h_0 \\ p_b = p_j - p_s = \rho_w g \frac{h_0(h_1 + 2h_2)}{h_0 + h_1 + 2h_2} \end{cases} \quad (2)$$

$$c \text{ 点: } \begin{cases} p_j = \rho_w g (h_0 + h_1) \\ p_s = \rho_w g \frac{h_0}{h_0 + h_1 + 2h_2} (h_0 + h_1) \\ p_c = p_j - p_s = \rho_w g \frac{(h_0 + h_1)(h_1 + 2h_2)}{h_0 + h_1 + 2h_2} \end{cases} \quad (3)$$

$$d点: \begin{cases} p_j = \rho_w g (h_0 + h_1 + h_2) \\ p_s = \rho_w g \frac{h_0}{h_0 + h_1 + 2h_2} (h_0 + h_1 + h_2) \\ p_d = p_j - p_s = \rho_w g \frac{(h_0 + h_1 + h_2)(h_1 + 2h_2)}{h_0 + h_1 + 2h_2} \end{cases} \quad (4)$$

$$e点: \begin{cases} p_j = \rho_w g (h_1 + h_2) \\ p_s = \rho_w g \frac{h_0}{h_0 + h_1 + 2h_2} h_2 \\ p_e = p_j + p_s = \rho_w g \frac{(h_0 + h_1 + h_2)(h_1 + 2h_2)}{h_0 + h_1 + 2h_2} \end{cases} \quad (5)$$

$$f点: \begin{cases} p_j = \rho_w g h_1 \\ p_s = 0 \\ p_f = p_j + p_s = \rho_w g h_1 \end{cases} \quad (6)$$

作用于板桩的剩余水压力为板桩两侧水压力差,用 Δp 表示:

$$a点: \Delta p_a = p_a = 0 \quad (7)$$

$$b点: \Delta p_b = p_b = \rho_w g \frac{h_0(h_1 + 2h_2)}{h_0 + h_1 + 2h_2} \quad (8)$$

$$c点: \Delta p_c = p_c - p_f = \rho_w g \frac{2h_0 h_2}{h_0 + h_1 + 2h_2} \quad (9)$$

$$d点: \Delta p_d = p_d - p_e = 0 \quad (10)$$

根据图6,剩余水压力最大值位于墙前水位处,而板桩底部的剩余水压力为0,这表明,在地基渗流条件下,若不考虑桩底水平段对地基渗流的影响,板桩底端两侧的有效水压力大小相等、方向相反。

1.3 桩底土层为透水土层,地基土为成层土

如图7所示,桩身范围内地基土为多层土, $H_1, H_2, \dots, H_n$ 分别表示各土层的厚度, $k_1, k_2, \dots, k_n$ 分别表示各土层的垂直渗透系数, h_0, h_1 分别表示板桩两侧水位差和港池水深。

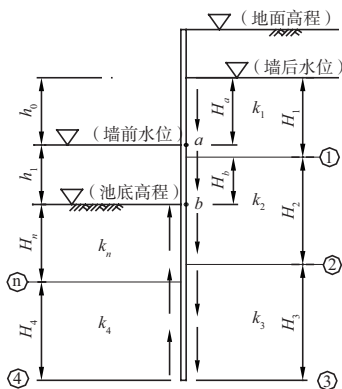


图7 透水土层

同理,要求解板桩墙剩余水压力,则必须首先求解板桩两侧各土层层面及各特征点的静水压力 p_j ,渗透水压力 p_s 以及有效水压力 p ,其中,墙后各土层层面及特征点的静水压力按墙后水位计算,墙前各土层层面及特征控制点的静水压力按墙前水位计算。

由于地基渗流为垂直渗流,渗流流向垂直于土层层面,根据达西定律,通过整个土的渗流量 q 必等于通过各土层的渗流量,即

$$q = q_1 = q_2 = \dots = q_n$$

$$\text{由 } q = k \frac{h}{H} A, q_i = k_i \frac{\Delta h_i}{H_i} A, \text{ 可得: } k \frac{h}{H} A = k_i \frac{\Delta h_i}{H_i} A$$

$$\text{则} \quad \Delta h_i = \frac{k}{k_i} \frac{H_i}{H} h \quad (11)$$

式中: h 为整个土层的水头损失, $h=h_0$; Δh_i 为渗流穿过计算土层所产生的水头损失; $i=1, 2, \dots, n$; K_i 为计算土层的垂直渗透系数; H_i 为计算土层的厚度; k 为整个土层的平均渗透系数。

$$k = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \dots + \frac{H_n}{k_n}} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{H_i}{k_i} \right)} \quad (12)$$

H 为渗透土层的总厚度:

$$H = H_1 + H_2 + \dots + H_n = \sum_{i=1}^n H_i \quad (13)$$

根据式(11)可求得地基渗流各土层的水头损失,各土层层面的渗透水压力则为水的密度 ρ_w 与计算层面以上各土层水头损失之和的乘积,如:层面①, $p_{s-1} = \rho_w g \Delta h_1$;层面②, $p_{s-2} = \rho_w g (\Delta h_1 + \Delta h_2)$; $\dots$; 计算时应按板桩前和板桩后分别计算。对于土层中各特征点的渗透压力可根据相应土层的水头损失按直线比例法求解,如图7: a 点, $p_{s-a} = \rho_w g \frac{H_a}{H_1} \Delta h_1$; b 点,

$$p_{s-b} = \rho_w g \left(\Delta h_1 + \frac{H_b}{H_2} \Delta h_2 \right); \dots。$$

2 算例

2.1 例1

图8为某单锚地连墙码头断面,码头面高程3.5 m,港池高程-4.5 m,墙前水位-1.5 m,墙后地下水位1.5 m,桩底高程-16.5 m,墙厚60 cm,地基土为均质透水性土, $C=0$, $\phi=30^\circ$, $\rho=1.9 \text{ t/m}^3$,取 $g=10 \text{ m/s}^2$,码头前沿地面荷载取 $q=20 \text{ kN/m}^2$,

求地连墙结构内力。

根据图8, $h_0=3.0$ m, $h_1=3.0$ m, $h_2=12.0$ m, 则 $h_0+h_1+2h_2=30.0$ m, 取 $\rho_w=1$ t/m³, 取 $g=10$ m/s², 地连墙结构计算采用竖向弹性地基梁法进行计算, 共分两种计算工况, 工况1: 墙后剩余水压力

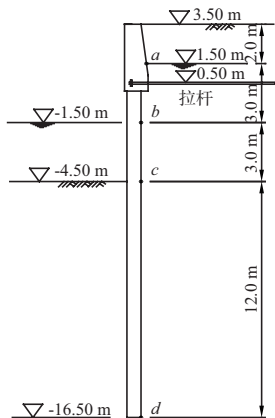


图8 透水土层

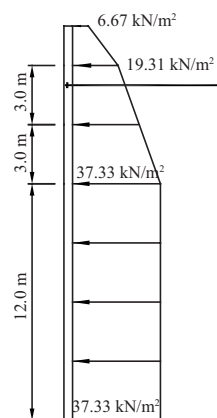


图9 墙后土压力分布

不考虑地基渗流影响, 其荷载组合为图9+图10; 工况2: 墙后剩余水压力考虑地基渗流影响, 其荷载组合为图9+图11; 其中, 渗流条件下墙后剩余水压力按式(7)~(10)计算, 计算结果见图12和13。

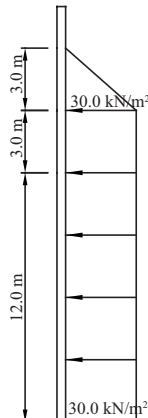


图10 不考虑的基渗流
剩余水压力分布

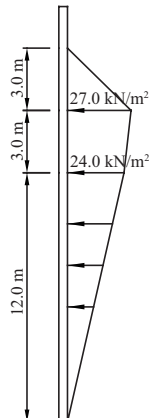
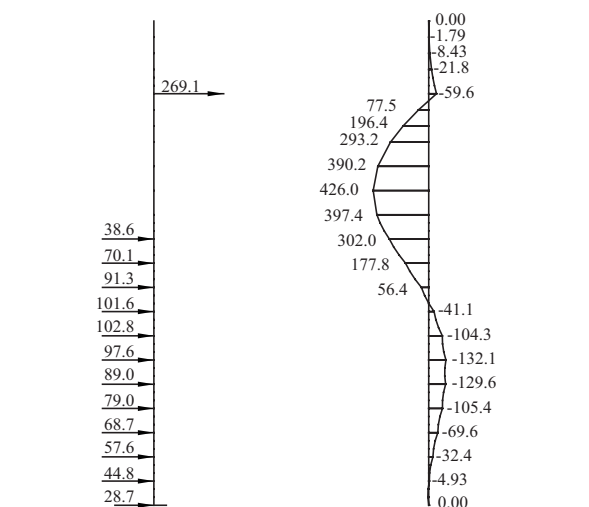
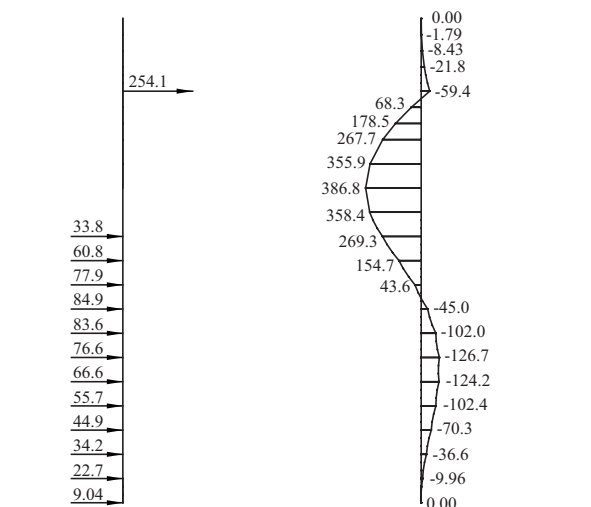


图11 考虑地基渗流
剩余水压力分布



a) 支座反力 (单位: kN) b) 弯矩分布 (单位: kN·m)

图12 工况1支座反力与墙身弯矩分布



a) 支座反力 (单位: kN) b) 弯矩分布 (单位: kN·m)

图13 工况2支座反力与墙身弯矩分布

根据计算结果, 工况1: 拉杆拉力为269.1 kN, 墙身最大弯矩为426.0 kN·m; 工况2: 拉杆拉力为254.1 kN, 墙身最大弯矩为386.8 kN·m; 工况2较工况1, 拉杆拉力减小了15 kN, 减小5.7%, 墙身最大弯矩减小了39.2 kN·m, 减小了9.2%。

2.2 例2

图14为某船坞坞墙结构断面, 为单锚空箱地连墙结构, 坞墙高度3.2 m, 空箱底高程-2.0 m, 地连墙底高程-28.0 m, 坞室底板面高程-9.2 m, 底板下设级配反滤层底高程-10.8 m, 墙后地下水

位-2.0 m。地基土为多层透水性土, 各土层的厚度及垂直渗透系数见图14, 不计桩底水平段对地基渗流的影响, 求地连墙剩余水压力分布。

根据图14, 墙后水位-2.0 m, 墙前水位-10.8 m, 则渗透水头 $h=8.8$ m, 各渗透土层的厚度: $H_1=6.0$ m, $H_2=7.0$ m, $H_3=H_6=5.0$ m, $H_4=H_5=8.0$ m, $H_7=4.2$ m; 各土层的垂直渗透系数: $k_1=1.2 \times 10^{-4}$ cm/s, $k_2=3.5 \times 10^{-4}$ cm/s, $k_3=k_6=2.5 \times 10^{-4}$ cm/s, $k_4=k_5=2.5 \times 10^{-4}$ cm/s, $k_7=4.2 \times 10^{-4}$ cm/s。

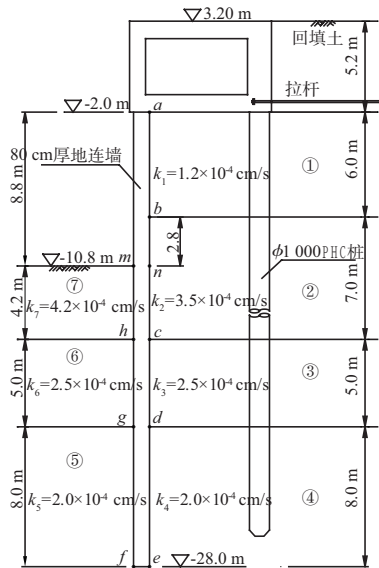


图14 透水土层

1) 渗透土层总厚度。

$H=43.2\text{ m}$ 。

2) 整个渗透土层的平均渗透系数。

$k=2.16 \times 10^{-4}\text{ cm/s}$ 。

3) 各渗透土层的水头损失。

按式(11)计算: $\Delta h_1=2.20\text{ m}$; $\Delta h_2=0.88\text{ m}$;

$\Delta h_3=\Delta h_6=0.88\text{ m}$; $\Delta h_4=\Delta h_5=1.76\text{ m}$; $\Delta h_7=0.44\text{ m}$ 。

4) 各土层层面及特征点的静水压力 p_j 、渗透水压力 p_s 和有效水压力 p 。

a点: $p_j=0$, $p_s=0$, $p_a=p_j-p_s=0$;

b点: $p_j=60.0\text{ kN/m}^2$, $p_s=22.0\text{ kN/m}^2$,
 $p_b=p_j-p_s=38.0\text{ kN/m}^2$;

n点: $p_j=88.0\text{ kN/m}^2$, $p_s=25.52\text{ kN/m}^2$,
 $p_n=p_j-p_s=62.48\text{ kN/m}^2$;

c点: $p_j=130.0\text{ kN/m}^2$, $p_s=30.8\text{ kN/m}^2$,
 $p_c=p_j-p_s=99.2\text{ kN/m}^2$;

d点: $p_j=180.0\text{ kN/m}^2$, $p_s=39.6\text{ kN/m}^2$,
 $p_d=p_j-p_s=140.4\text{ kN/m}^2$;

e点: $p_j=260.0\text{ kN/m}^2$, $p_s=57.2\text{ kN/m}^2$,
 $p_e=p_j-p_s=202.8\text{ kN/m}^2$;

f点: $p_j=172.0\text{ kN/m}^2$, $p_s=30.8\text{ kN/m}^2$,
 $p_f=p_j+p_s=202.8\text{ kN/m}^2$;

g点: $p_j=92.0\text{ kN/m}^2$, $p_s=13.2\text{ kN/m}^2$,
 $p_g=p_j+p_s=105.2\text{ kN/m}^2$;

h点: $p_j=42.0\text{ kN/m}^2$, $p_s=4.4\text{ kN/m}^2$,
 $p_h=p_j+p_s=46.4\text{ kN/m}^2$;

m点: $p_j=0$, $p_s=0$, $p_m=p_j+p_s=0$ 。

5) 各土层层面及特征点的剩余水压力 Δp 。

a点: $\Delta p_a=p_a=0$;

b点: $\Delta p_b=p_b=38.0\text{ kN/m}^2$;

n点: $\Delta p_n=p_n-p_m=62.48\text{ kN/m}^2$;

c点: $\Delta p_c=p_c-p_h=52.8\text{ kN/m}^2$;

d点: $\Delta p_d=p_d-p_g=35.2\text{ kN/m}^2$;

e点: $\Delta p_e=p_e-p_f=0$;

剩余水压力分布见图15。

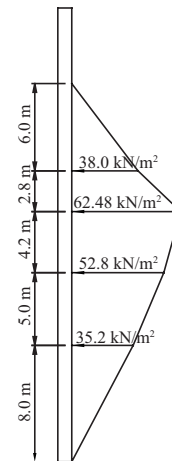


图15 剩余水压力分布

3 结语

本文侧重分析了地基渗流对剩余水压力分布的影响,分析成果表明,当桩底土层为不透水土层时,板桩两侧水压力均为静水压力,剩余水压力分布仅与板桩两侧的设计水位有关:墙前水位以上呈三角形分布,墙前水位以下呈矩形分布。当桩底土层为透水土层时,板桩两侧受到静水压力和渗透水压力的共同作用,剩余水压力的分布不仅与板桩两侧的设计水位有关,而且与地基土层的分布和性质以及地基土层的渗透系数均有关,根据算例,剩余水压力最大值位于墙前水位处,而桩底的剩余水压力则为0。

参考文献:

- [1] JTS 167-3—2009板桩码头设计与施工规范[S].
- [2] JTJ 252—1987干船坞水工结构设计规范[S].
- [3] 李家星,赵振兴.水力学[M].南京:河海大学出版社,2001.
- [4] 钱家欢.土力学[M].南京:河海大学出版社,1998.
- [5] 韩理安.港口水工建筑物[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [6] 顾民权.海港工程设计手册[M].北京:人民交通出版社,1997.

(本文编辑 武亚庆)