



# 重力式码头抛石基床应力分析

秦川<sup>1</sup>, 别社安<sup>2</sup>

(1. 天津滨海新区建设投资集团有限公司, 天津 300457;

2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 现行规范中, 计算重力式码头抛石基床应力时假定基床是刚性的, 不考虑基床前、后方的土压力, 只考虑基床自重和基顶应力向下的传播。随着大型重力式码头抛石基床深度的不断加大, 基床前、后方的土压力也在不断的加大, 现行规范这种计算方法与实际情况就存在较大的差异。通过系统的计算、研究, 分析厚抛石基床前后方土压力对基床内应力分布的影响, 根据有限元软件PLAXIS计算出应力分布规律, 提出了一种采用3个应力控制点的更合理的改进计算方法。

**关键词:** 厚抛石基床; 地基应力; 影响因素; 改进算法

中图分类号: U 656.1<sup>+</sup>11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0088-06

## Stress distribution in rubble bed of gravity wharf

QIN Chuan<sup>1</sup>, BIE She-an<sup>2</sup>

(1. Tianjin Binhai New Area Construction Investment Group Co., Ltd., Tianjin 300457, China;

2. College of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Being used to calculate the foundation stress, the method of actual criterion assumes that the rubble bed is rigid. Although it refers to the weight of the rubble bed and the stress on the top, the earth pressure in front and at the back of the rubble bed are not considered. With the development of the great gravity wharf, the depth of rubble bed increases, so the earth pressure in front and at the back of the rubble bed also increases. Hence, there must be some differences between the criterion method and the actual situation. The paper analyzes the effect of the earth pressure on the distribution of foundation stress by systemic study and calculation. According to the result of engineering FEM program PLAXIS, a more rational method with three controlling points is put forward.

**Key words:** deep rubble bed; foundation stress; influence factors; improved calculation method

当前, 一方面重力式码头在向大型深水泊位发展; 另一方面, 在地基承载力不是很高的地方, 比如软土地基, 也要求建造重力式码头, 这样码头结构将会很宽大, 为满足基床承载力等方面的要求, 重力式码头抛石基床的深度也需要加深。随着抛石基床厚度的增加, 基床前、后方的土压力也在不断加大; 而在现行规范中, 重力式码头抛石基床底面应力的计算假定不考虑基床前、后方的土压力, 只考虑基床自重和基顶应力向下的传播<sup>[1-2]</sup>。因此, 抛石基床越大, 规范方法与实际情况的差异可能就越大, 为保证抛石基床

设计的安全性, 尚需要通过系统、深入的研究, 分析厚抛石基床前后方土压力对基床内应力分布的影响, 以确定更合理的计算方法。

### 1 数值模拟

本文采用弹塑性有限元法<sup>[3-4]</sup>的思想, 用有限元软件PLAXIS对重力式码头抛石基床进行计算分析。在本构模型中, 假设抛石基床材料为均质连续介质, 材料只能承受压应力, 不能承受拉应力。通过数值模拟计算, 可以得到抛石基床内部的应力分布规律。

收稿日期: 2013-06-28

作者简介: 秦川(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事港口、水利工程结构研究以及混凝土微观力学、动力学研究。

1.1 PLAXIS程序简介<sup>[5]</sup>

PLAXIS程序是荷兰的岩土工程有限元软件, 能够模拟复杂的工程地质条件, 尤其适合于变形和稳定分析。PLAXIS程序能够计算两类工程问题, 即平面应变问题和轴对称问题。

1.1.1 本构模型

本文采用PLAXIS的线弹性模型、摩尔-库仑模型进行分析计算。

1) 线弹性模型 (Linear Elastic Model)。

重力式结构的本构关系简化为线弹性模型。该模型参数包括压缩模量 $E$ , 密度 $\rho$ , 泊松比 $\mu$ 。

2) 摩尔-库仑模型 (Mohr-Coulomb Model)。

土体是否破坏采用摩尔-库仑破坏准则来进行判别。一旦土体内任意平面上的剪应力达到了土的抗剪强度, 土就发生破坏, 而任意平面上的抗剪强度只是该面上法向应力函数, 即:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中:  $c$ 和 $\varphi$ 为土体强度参数。

摩尔-库仑模型参数包括干密度 $\rho_{unsat}$ , 饱和密度 $\rho_{sat}$ , 压缩模量 $E$ , 泊松比 $\mu$ , 粘聚力 $c$ , 摩擦角 $\varphi$ 。

1.1.2 界面单元 (interface)

为了模拟结构与土的相互作用, PLAXIS程序引入了界面单元的概念。用一个弹塑性模型描述

界面的性质, 来模拟土与结构侧面的相互作用, 并用 $R_{inter}$ 反映两者相互作用的程度。界面单元的强度等于周围土体的强度乘以土与界面单元的摩擦系数 $R_{inter}$ 。当土与结构变形一致, 两者之间没有相对滑动时,  $R_{inter}=1.0$ ; 而当两者有相对滑动时, 界面单元的强度低于周围土体的强度,  $R_{inter}<1$ 。一般地, 对于真正的土与结构相互作用的问题, 界面单元比周围土体软弱,  $R_{inter}<1$ 。本文根据PLAXIS程序中推荐的各种模型参数, 取 $R_{inter}=0.6$ 。

当界面单元为弹性时, 剪应力为:

$$|\tau| < \sigma_n \tan \varphi_i + C_i \quad (2)$$

当界面单元为塑性时, 剪应力为:

$$|\tau| = \sigma_n \tan \varphi_i + C_i \quad (3)$$

式中:  $\varphi_i$ 和 $C_i$ 分别为界面单元的摩擦角和粘聚力;  $\sigma_n$ 为作用在界面单元上的正应力;  $\tau$ 为剪应力。

1.2 工程实例数值分析

码头结构参数为: 轴向刚度 $EA=2.0 \times 10^8$  kNm, 抗弯刚度 $EI=1.5 \times 10^6$  kN·m<sup>2</sup>/m, 等效厚度 $d=0.3$  m, 密度 $w=1.0$  t·m<sup>-3</sup>·m<sup>-1</sup>, 泊松比 $\mu=0.15$ 。

1.2.1 广州南沙港区一期工程

广州港南沙港区一期工程, 土体参数见表1, PLAXIS有限元模型及基床应力分布见图1。

表1 广州南沙港区一期工程土体参数

土体类型	干密度 $\rho_{dry}/(t \cdot m^{-3})$	饱和密度 $\rho_{wet}/(t \cdot m^{-3})$	压缩模量 $E/(kN \cdot m^{-2})$	泊松比 $\mu$	粘聚力 $c/(kN \cdot m^{-2})$	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
回填砂土	1.8	1.95	$2.0 \times 10^4$	0.3	0.0	28
地基砂土1	1.8	1.95	$2.0 \times 10^5$	0.3	0.0	30
地基砂土2	1.8	1.95	$2.0 \times 10^5$	0.3	2.0	32
基床块石	1.8	2.10	$2.0 \times 10^5$	0.3	0.0	45

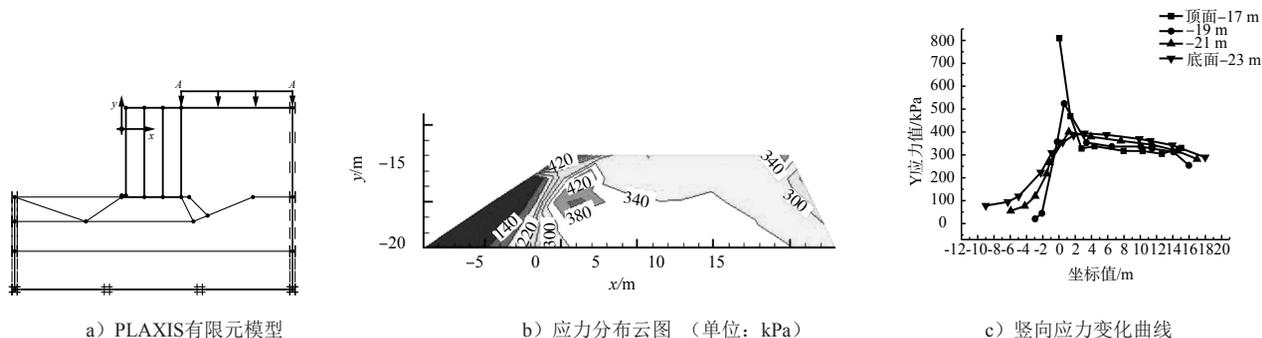


图1 广州南沙港区一期工程模型及应力分布

1.2.2 三百门电厂大件码头工程

表2, PLAXIS有限元模型、基床应力分布见图2。

三百门电厂大件码头工程, 码头土体参数见

表2 三百门电厂大件码头工程土体参数

土体类型	干密度 $\rho_{dry}/(t \cdot m^{-3})$	饱和密度 $\rho_{wet}/(t \cdot m^{-3})$	压缩模量 $E/(kN \cdot m^{-2})$	泊松比 $\mu$	粘聚力 $c/(kN \cdot m^{-2})$	摩擦角 $\phi/(^\circ)$
回填块石	1.8	21	2.0e4	0.3	0.0	45
基床块石	1.8	21	2.0e5	0.3	0.0	45
地基砂土	1.8	21	2.0e5	0.3	2.0	30

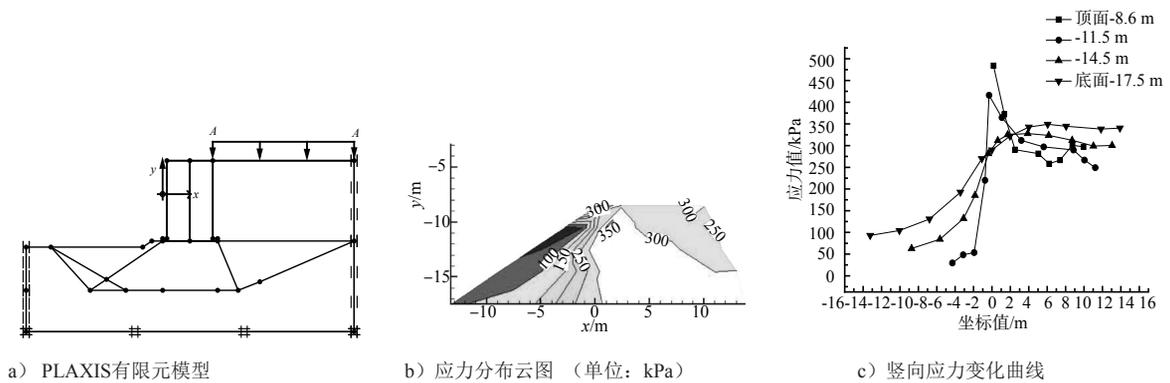


图2 三百门电厂大件码头工程模型及应力分布

1.2.3 深圳电厂专用卸煤码头工程

3, PLAXIS有限元模型、基床应力分布见图3。

深圳电厂专用卸煤码头工程, 土体参数见表

表3 深圳电厂专用卸煤码头工程土体参数

土体类型	干密度 $\rho_{dry}/(t \cdot m^{-3})$	饱和密度 $\rho_{wet}/(t \cdot m^{-3})$	压缩模量 $E/(kN/m^2)$	泊松比 $\mu$	粘聚力 $c/(kN \cdot m^{-2})$	摩擦角 $\phi/(^\circ)$
沉箱砂	1.8	1.95	$2.0 \times 10^4$	0.3	0.0	28
地基砂土	1.8	1.95	$2.0 \times 10^5$	0.3	1.0	28
回填块石	1.8	2.10	$2.0 \times 10^4$	0.3	0.0	45
抛石基床	1.8	2.10	$2.0 \times 10^5$	0.3	0.0	45

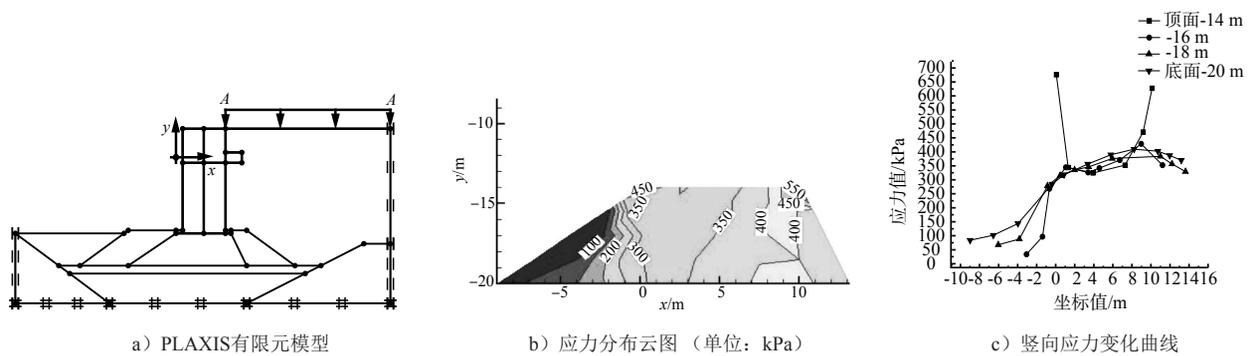


图3 深圳电厂专用卸煤码头工程模型及应力分布

## 2 基于有限元分析结果的改进计算方法

以上有限元数值模拟分析表明, 基床应力分布有两个明显的特点: 1) 从前趾垂向向前, 基床竖向应力减小很快; 2) 上部结构正下方基床内应力近似呈梯形分布; 基床较深处, 上部结构正下方的竖向应力分布较均匀。这些都说明前趾的应力集中向前和向下扩散的范围都是有限的, 原规范“基顶应力向前1:1.5扩散, 向后1:0.5扩散”的假设有待进一步研究。

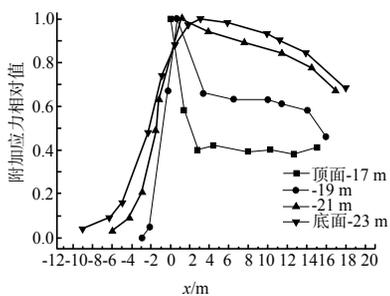
根据有限元分析的应力分布规律, 考虑基床前、后方土压力, 提出一种新的改进计算方法, 并对3个工程实例进行计算, 将结果与规范方法进行比较, 可以发现, 新的改进方法比原规范方法更加合理。

其中抛石基床前、后土压力采用文献[6]总结的计算方法: 基床前方的土压力采用被动土压力计算公式, 土体参数采用基槽边坡土的物理力学指标, 并乘以0.3折减系数; 基床后方土压力采用主动土压力计算公式, 土体参数采用基床材料的物理力学指标<sup>[6]</sup>。

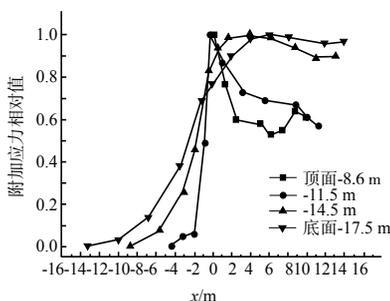
### 2.1 改进方法的理论推导

#### 2.1.1 附加应力扩散宽度分析

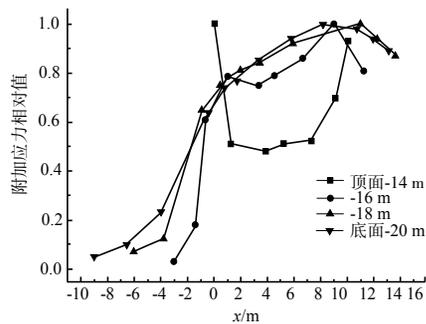
将基床内部不同深度处的有效应力减去基床自重应力, 可以得到不同深度处的附加应力分布(图4, 以每个深度处最大的附加应力为单位1)。



a) 南沙港



b) 三百门电厂大件码头



c) 深圳电厂专用卸煤码头

图4 不同深度处的附加应力分布

取不同深度处附加应力为该深度处最大附加应力的10%所对应的x坐标, 见表4。

表4 附加应力衰减到10%对应x坐标

深度/m	x/m		
	南沙港	深圳	三百门
2.0	-2.0	-2.1	
3.0			-1.8
4.0	-4.1	-4.8	
6.0	-6.2	-6.6	-5.4
8.9			-7.8

从表4可以发现, 不同深度处附加应力迅速消散到10%时, 从前趾向前扩散宽度约等于深度d, 即 $x=-d$ ; 从图4可以发现, 小于10%后消散渐缓。越深处, 上部结构正下方的附加应力分布越均匀。

#### 2.1.2 改进方法

根据以上分析可得到如下两个假设: 1) 小于10%的附加应力可以忽略不计, 即附加应力从前趾向前计算宽度等于深度d; 2) 上部结构正下方基床内附加应力近似呈梯形分布。

基于以上两个假设, 应采用3个应力特征控制点来描述基床应力的分布, 分别为前趾下方、后趾下方和前趾下方向前延伸宽度 $x=d$ 处。其中前趾下方向前延伸宽度 $x=d$ 处附加应力为零, 并设前趾下方、后趾下方附加应力大小分别为Y和Z, 见图5。

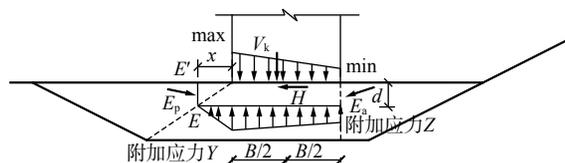


图5 基床深度d处附加应力分布计算

对基床底面E点，由弯矩平衡得：

$$M'_0 + Hd + X^2 Y/3 + BZ(B/2 + X) + B(Y - Z) \cdot (X + B/3)/2 = M'_R + V_k(X + \xi) \quad (4)$$

$$Y = \frac{2(V_k + E_{av} + E_{pv})(X/2 + B/3) + M'_0 + Hd - M'_R - V_k(X + \xi)}{X^2/6 + XB/3 + B^2/6} \quad (6)$$

代入式(5)可得附加应力：

$$Z = \frac{2V_k + 2E_{av} + 2E_{pv} - (X + B)Y}{B} \quad (7)$$

其中：

$$M'_R = \frac{1}{6} \rho_1 g d^3 K_{ph} \times 0.3 + \frac{1}{2} \rho_2 g d^2 (B + X) K_{av} + d(\sum \rho D + q)(B + X) K_{av} \quad (8)$$

$$M'_0 = \frac{1}{6} \rho_2 g d^3 K_{ah} \quad (9)$$

$$E_{av} = \frac{1}{2} \rho_2 g d^2 K_{av} + d(\sum \rho g D + q) K_{av} \quad (10)$$

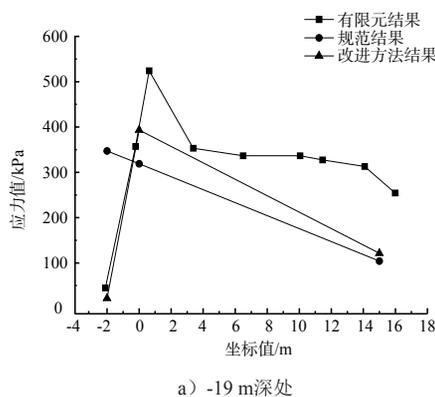
$$E_{pv} = \frac{1}{2} \rho_1 g d^2 K_{pv} \times 0.3 \quad (11)$$

式中：X为附加应力从前趾向前扩散宽度，根据上节分析取深度d；Y为上部结构前趾下附加应力大小；Z为上部结构后趾下附加应力大小；ξ为基床底面合力标准值的作用点到前趾距离(m)；ρ<sub>1</sub>为抛石基床前地基土密度；ρ<sub>2</sub>为抛石基床块石密度；M'<sub>R</sub>、M'<sub>0</sub>分别为抛石基床前被动土压力(考虑0.3倍折减)和抛石基床后主动土压力对基床底面前趾的稳定力矩和倾覆力矩(kN·m)；E<sub>av</sub>、E<sub>pv</sub>分别为抛石基床前主动土压力竖向分力和抛石基床后被动土压力竖向分力(考虑0.3倍折减)。

### 2.2 工程实例计算

#### 2.2.1 南沙港

不同深度处附加应力与规范计算结果及有限元结果比较(图6)。



根据竖向力平衡可得：

$$XY/2 + B(Y + Z)/2 = V_k + E_{av} + E_{pv} \quad (5)$$

联立以上两个方程可得附加应力：

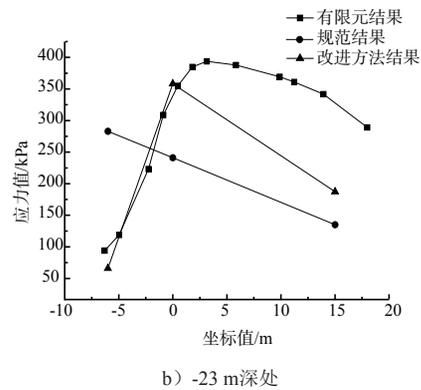


图6 南沙港不同深处竖向应力分布

#### 2.2.2 三百门电厂大件码头工程

不同深度处附加应力与规范计算结果及有限元结果比较见图7。

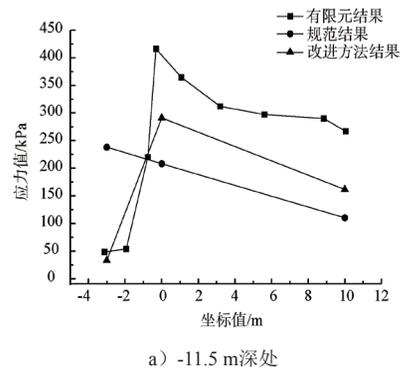


图7a) -11.5 m深处

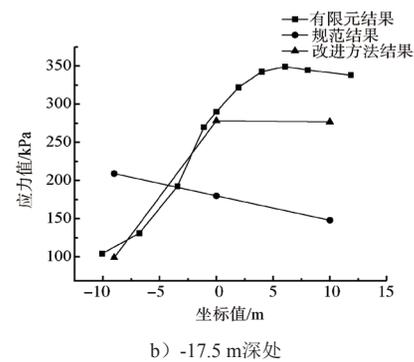


图7b) -17.5 m深处

图7 三百门电厂大件码头不同深处竖向应力分布

#### 2.2.3 深圳电厂专用卸煤码头工程

不同深度处附加应力与规范计算结果及有限元结果比较见图8。

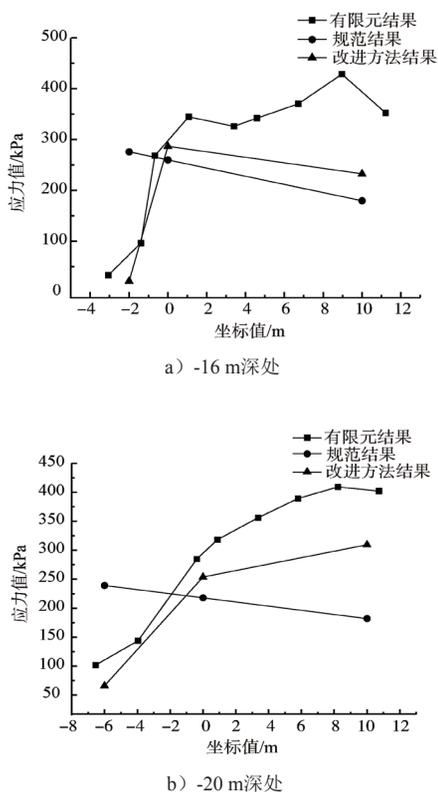


图8 深圳电厂专用卸煤码头不同深处竖向应力分布

### 3 结语

1) 对任何工程实例的任何基床深度, 原规范计算结果总是前趾大后趾小; 而改进方法则根据不同工程实例和不同深度, 计算出的结果会有所不同, 更符合有限元计算结果的变化趋势。

一方面考虑到前趾应力集中不可能无限扩展, 在基床较深处已经消散到很小值; 另一方面考虑到后方堆载土压力对后侧基床竖向的影响, 随着基床深度的增加, 竖向应力应有趋于平均的

趋势, 在较深处还有可能是后趾的竖向应力大。这跟有限元数值模拟和改进方法的计算结果都是一致的, 也证明了改进方法的合理性。

2) 从改进方法计算结果与有限元结果比较看, 应力从前趾向前扩散这一部分计算结果基本一致, 上部结构正下方基床内这一部分应力分布趋势是相同的, 但在数值上还是有一些差异, 有限元的计算结果较大。

3) 从改进方法与原规范方法计算结果比较看, 不同深度处的竖向应力最大值, 改进方法计算的结果较大, 深度越深, 两者计算结果最大值的差距越大。

4) 建议基床应力采用本文提出的改进计算方法; 基床向前随深度增加宽度可以由 $1.5d$ 减小到 $d$ 。

### 参考文献:

- [1] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].
- [2] 邱驹. 港工建筑物[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.
- [3] Bathe K J. Finite element procedures in engineering analysis [M]. USA: Prentice-Hall, 1982.
- [4] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [5] 北京金土木软件技术有限公司. PLAXIS岩土工程软件使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [6] 只红茹. 重力式码头抛石基床稳定性研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.

( 本文编辑 武亚庆 )

