



# 曹妃甸海事码头沉降计算分析

寇本川, 郑天立

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 曹妃甸海事码头为3 000吨级重力式空心方块码头, 地基土层主要是粉砂层和粉质黏土层, 工程地质性质较好。利用分层总和法对码头沉降进行计算, 并采用有限差分法进行数值模拟计算, 通过合理选择关键参数(单向压缩经验系数和弹性模量)上述两种方法得出的计算结果与观测数据基本吻合, 从而验证了两种计算方法在类似地质条件下的适用性。

**关键词:** 重力式码头; 分层总和法; 有限差分法; 沉降

中图分类号: U 656.1<sup>+</sup>11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0158-06

## Calculation and analysis for settlement of Caofeidian maritime wharf

KOU Ben-chuan, ZHENG Tian-li

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** The 3 000 DWT gravity wharf is a hollow concrete block quay wall built on the strata of silty sand and silty clay, which has favorable engineering geologic features. This article calculates the wharf's settlement by the layer wise summation method, and makes numerical simulation by finite difference method. Selecting critical parameters (one dimension compression empirical coefficient and elastic modulus) reasonably, the calculation results given by the above-mentioned method are identical to the measured data, which proves that the calculation methods are appropriate to similar geologic conditions.

**Key words:** gravity wharf; layer wise summation method; finite difference method; settlement

### 1 工程概况

#### 1.1 工程位置

河北海事局曹妃甸海事工作船码头位于曹妃甸岛南侧甸头, 曹妃甸5万吨级通用散货码头南侧, 已建东防波堤内侧。其地理坐标为北纬38°55', 东经118°30'。本工程是重力式空心方块码头, 目前已经通过了竣工验收。

#### 1.2 地质条件

场地勘察深度内的土层为第四系全新统滨海

相沉积层, 沉积韵律较明显, 主要岩性为粉砂、粉质黏土、粉土, 多为层状土。依据土层的地质时代、岩性、分布规律和物理力学性质, 整个场地土层主要分为5个工程地质层(含亚层), 施工图补充勘察阶段工程地质剖面见图1。依据地质勘察报告的勘察成果, 本区域土层分布较有规律, 与计算相关的土层的主要物理力学指标见表1。

表1 各类材料主要物理力学指标

材料	$\rho/(t \cdot m^{-3})$	$\rho_d/(t \cdot m^{-3})$	$e$	$S_r/\%$	$\Phi_{cq}/(^\circ)$	$C_{cq}/kPa$	$E_s/MPa$	$\nu$	$k/(cm \cdot s^{-1})$
钢筋混凝土	2.45	2.45					$3.15 \times 10^4$	0.17	
10~100 kg块石	1.70	1.54		100.00	45.0	0	100	0.20	1.16
① <sub>2</sub> 粉砂	1.97	1.62	0.81	97.90	36.6	5.0	20.4	0.33	$3.47 \times 10^{-2}$

收稿日期: 2013-07-04

作者简介: 寇本川(1985—), 男, 硕士, 工程师, 注册一级建造师(港口), 从事港口工程和岩土工程设计。

续表

材料	$\rho/(t \cdot m^{-3})$	$\rho_d/(t \cdot m^{-3})$	$e$	$S_r/\%$	$\Phi_{cq}/(^\circ)$	$C_{cq}/kPa$	$E_s/MPa$	$\nu$	$k/(cm \cdot s^{-1})$
②粉质黏土夹粉砂	1.91	1.48	0.81	97.90	23.2	19.4	14.7	0.33	$2.30 \times 10^{-6}$
③ <sub>1</sub> 粉质黏土	1.93	1.51	0.77	98.14	20.8	21.8	16.2	0.33	$7.30 \times 10^{-7}$
③ <sub>2</sub> 粉质黏土	2.00	1.64	0.62	95.50	29.8	14.0	24.7	0.33	$4.20 \times 10^{-6}$
④粉质黏土	1.97	1.58	0.68	97.57	23.7	27.3	21.3	0.33	$4.20 \times 10^{-6}$

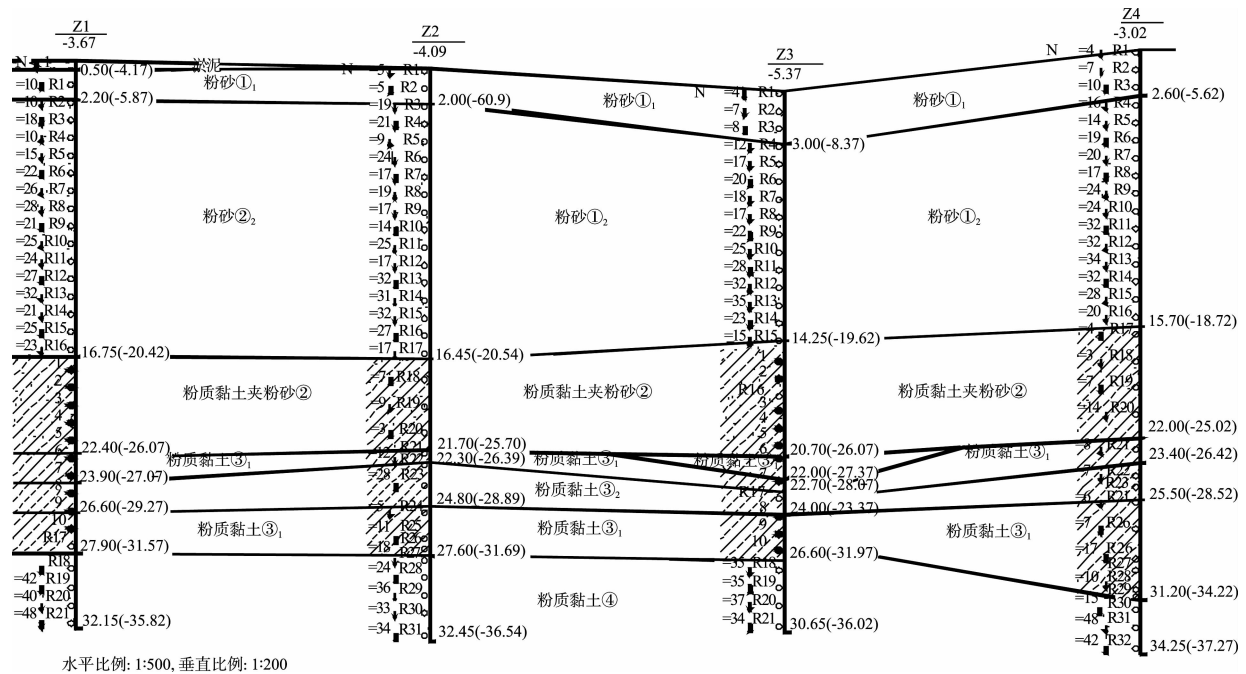


图 1 施工图补充勘察阶段工程地质剖面

### 1.3 设计断面

重力式空心方块码头的结构如图 2 所示<sup>[1]</sup>。

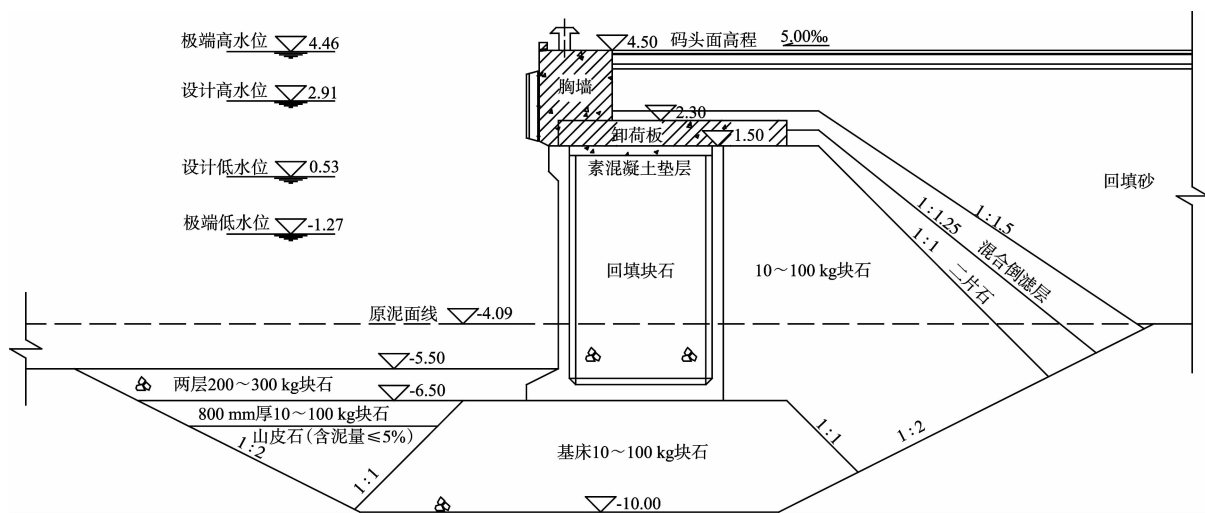


图 2 重力式空心方块码头结构断面

码头选用①<sub>2</sub>粉砂层作为持力层, 基床厚度取为 3.50 m。空心方块长 4.00 m, 宽 6.20 m, 高

8.00 m, 前趾宽 1.00 m, 单个质量约 147.20 t。空心方块内回填 10~100 kg 块石。施工中, 空心

方块采用 200 t 起重船吊装, 2 500 t 方驳运输, 现场安装。卸荷板长 4.00 m, 宽 7.80 m, 厚 0.80 m, 悬臂长度为 2.00 m, 单个质量约 56.88 t。现浇胸墙顶高程为 4.50 m, 顶宽 2.30 m。墙后回填抛石棱体至 1.50 m, 顶宽 3.00 m, 坡度 1:1。外侧依次铺设二片石、混合倒滤层和倒滤土工布, 外侧坡度为 1:1.5。

## 2 地基沉降计算方法概述

### 2.1 概述

由于地基沉降的问题十分复杂, 至今还没有完全解决。近几十年来, 国内外专家提出了很多计算方法。如分层总和法、考虑应力历史的地基沉降方法、应力路径法、有限元法和有限差分法等<sup>[2]</sup>。针对重力式码头沉降问题, 本文将尝试采用分层总和法进行计算, 用有限差分法进行数值模拟, 最后与实际沉降数据进行对比分析。

### 2.2 分层总和法

分层总和法是工程中使用较多的沉降计算方法之一, 这种方法不考虑土层的侧向变形, 因而求得地基垂直附加应力设计值  $\sigma_z = 0.2\sigma_c$  后, 利用室内压缩试验成果  $e-p$  曲线 (图 3), 便可采用

经验系数法分层计算地基的最终沉降量<sup>[3]</sup>, 即

$$S_{d\infty} = m_s \sum \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} h_i \quad (1)$$

由于主要压缩土层压缩模量接近 15 MPa, 参照地基土体侧限压缩模量变化范围及实际沉降观测数据, 经过多次试算选取经验系数  $m_s$  为 0.7<sup>[4]</sup> 计算与实际观测结果比较吻合 (压缩土层厚度见图 1)。

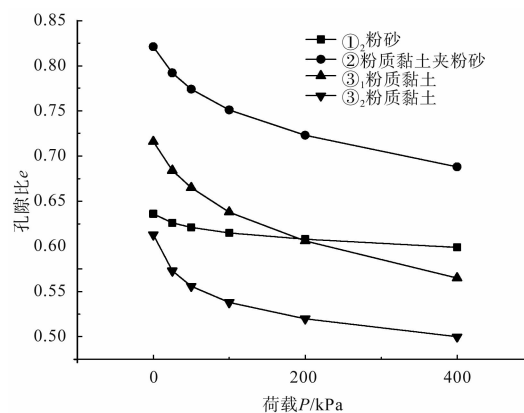


图 3 主要土层  $e-p$  曲线

港口工程地基计算系统 (DJS2008) 软件可以实现各级加载及总荷载下的地基最终沉降量和若干给定时刻的沉降量计算, 得出解析解。参照 Z2 钻孔土层分布情况建模, 分级加载及沉降计算结果见表 2。

表 2 空心方块底板中点沉降计算结果

加荷级别	分级荷载	起始日期	终止日期	单段时间/d	累计时间/d	累计沉降/mm
1	安装空心方块	2011-06-13	2011-06-18	5	5	11
2	箱内回填块石	2011-06-19	2011-06-30	11	16	18
3	墙后回填块石	2011-07-01	2011-07-21	20	36	31
4	安装卸荷板	2011-07-22	2011-09-16	56	92	41
5	现浇胸墙及铺设面层	2011-09-17	2011-11-06	50	142	59
6	后期均布荷载	2011-11-07	2012-09-05	303	445	81

### 2.3 有限差分法计算原理

由于岩土工程问题的基本方程 (平衡方程、几何方程、本构方程) 和边界条件多以微分方程的形式出现, 因此可以很方便地用有限差分方法求解。

有限差分法求解偏微分方程的步骤为: 首先区域离散化, 即把所给偏微分方程的求解区域细分成由有限个格点组成的网格, 然后近似替代, 最后逼近求解。现以一个四面体说明计算时导数

的有限差分近似过程。设其内任一点的速率分量为  $v_i$ , 则可由高斯公式得:

$$\int_V v_{ij} dV = \int_S v_j n_j dS \quad (2)$$

对于常应变单元,  $v_i$  为线性分布,  $n_j$  在每个面上为常量, 由式 (2) 可得:

$$v_{ij} = -\frac{1}{3V} \sum_{i=1}^4 v_i n_j^{(i)} S^{(i)} \quad (3)$$

以节点为计算对象, 将力和质量均集中在节点上, 通过运动方程求解, 节点的运动方程可表

示为:

$$v_i^l\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = v_i^l\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) + \frac{p_i^l(t)}{m^l} \Delta t \quad (4)$$

式中:  $V$  为四面体的体积;  $S$  为四面体的外表面,  $n_j$  为外表面的单位法向量分量, 上标  $l$  表示节点  $l$  的变量,  $(l)$  表示面  $l$  的变量<sup>[5]</sup>。

模型中岩土体变形参数采用剪切模量和体积模量, 需要采用如下公式将压缩模量转化为变形模量:

$$E_0 = \left(1 - \frac{2\nu^2}{1 - \nu}\right) E_s = \beta E_s \quad (5)$$

式(5)中  $E_0$  和  $E_s$  之间的理论关系, 是基于线弹性假定得到的, 即  $E_0 < E_s$ , 但土体不是完全弹性体, 而且由于现场载荷试验和室内侧限压缩试验测定相应指标时存在各种无法考虑的因素, 如压缩试验的土样受扰动较大、载荷试验与压缩试验的加荷速率、压缩稳定标准均不一样等, 使得理论计算结果与实测结果有一定差距。同时由于基槽开挖卸载的扰动, 基床抛石加载时地基的压缩性要比之前的压缩性小很多, 即  $E_0$  值增大。实测资料表明  $E_0$  要比  $E_s$  大得多, 可能是十几倍或者更大<sup>[6]</sup>。对于较硬的土,  $E_0$  是  $\beta E_s$  值的 2 ~ 8 倍, 土愈坚硬, 倍数愈大<sup>[2]</sup>。参照实际统计资料及实际观测数据, 经过多次试算选取  $E_0 = 5E_s$  计算与实际观测结果比较吻合。

然后利用以下公式将变形模量转化为剪切模量和体积模量:

$$G = \frac{E_0}{2(1 + \nu)} \quad (6)$$

$$K = \frac{E_0}{3(1 - 2\nu)} \quad (7)$$

接触面单元的  $c$  值取相邻土层的 0.5 倍,  $\varphi$  值取相邻土层的 0.6 倍, 法向刚度和剪切刚度取周围“最硬”相邻区域的等效刚度的 10 倍:

$$K_n = K_s = 10[(K + 4G/3)/\Delta z_{\min}] \quad (8)$$

式中:  $E_0$  为变形模量;  $\nu$  为泊松比;  $E_s$  为压缩模量;  $G$  为土的剪切模量;  $K$  为土的体积模量;  $K_n$ ,  $K_s$  分别为法向刚度和切向刚度 (MPa);  $\Delta z_{\min}$  为接触面法向上连接区域上的最小尺寸, 取为 1, 无量纲<sup>[5]</sup>。

模型左侧深度为 33 m, 右侧深度为 45 m, 横向宽度 100 m, 纵向长度 10 m。模型通过自身的应力重分布达到平衡, 左边界和右边界节点水平速度设为零, 底边界节点 3 个方向速度设为零, 两个纵向面上水平速度也设为零。土体的本构模型采用摩尔-库仑模型, 空心方块与 10 ~ 100 kg 块石之间设置接触面单元来模拟两者之间的相互作用。为避免模型计算中单元的应力集中, 模型中简化了空心方块的前趾和卸荷板, 以近似模拟沉降结果。应力监测点的比较结果见表 3。对比发现, 模型计算得到的应力场与理论值十分接近, 可以认为模型的计算结果是可靠的。

依据图 4, 5 模型, 模拟结构的分级加载, 最终的水平位移和竖向位移见图 6。

表 3 应力监测点的比较

比较内容	应力点	应力/kPa	
		理论值	计算值
弹性静力分析竖向应力	左侧下角节点	253.13	279.50
	右侧下角节点	459.13	447.50
施加孔压后的孔压值	左侧下角节点	430.50	430.50
	右侧下角节点	430.50	430.50
施加水压力荷载后的总应力	左侧下角节点	683.63	710.00
	右侧下角节点	889.63	878.00

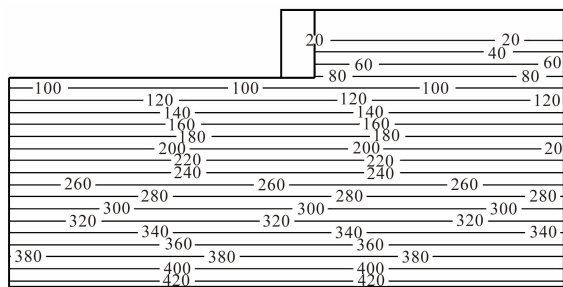


图4 孔隙水压力应力 (单位: kPa)

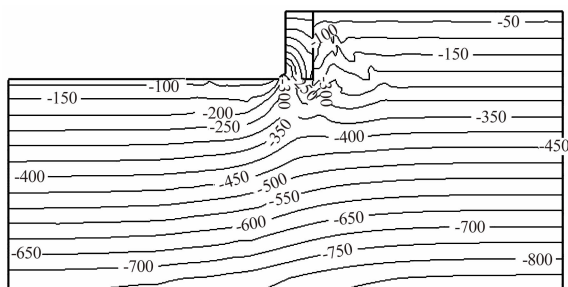
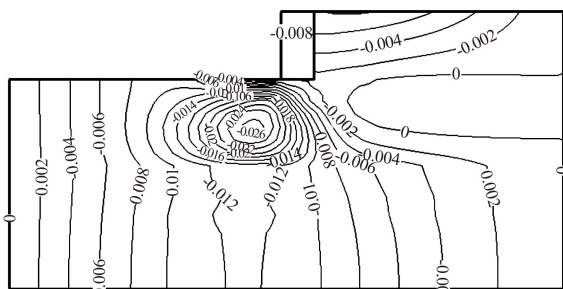
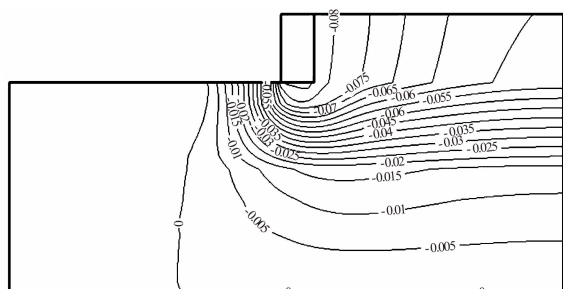


图5 总应力 (单位: kPa)



a) 水平位移



b) 竖向位移

图6 位移等值线 (单位: m)

模型的最大水平位移为 26.70 mm (图中向左的位移为负值), 发生在①<sub>2</sub>粉砂层, 距离空心方块底端垂直距离 7.00 m; 最大竖向位移为 87.10 mm (图中向下的位移为负值), 发生在空心方块底端海侧节点。从模型可知, 空心方块前趾底端土层水平位移最大, 空心方块发生前倾, 海侧表层的土层有拱起的现象, 且由于空心方块

底端海侧区域应力集中, 竖向沉降位移最大, 模拟结果与实际情况基本一致。

### 3 沉降数据对比分析

#### 3.1 实际沉降数据

在空心方块安装与回填、墙后回填、卸荷板安装、现浇胸墙等全过程中, 码头前沿空心方块底板中点纵向线上布置了 12# ~ 16# 共 5 个监测点, 并实现了不间断地监测。截止 2012 年 9 月 5 日, 共 445 d 累计平均沉降量为 84.6 mm, 标准差为 2.30 mm, 满足规范中方块码头计算断面地基平均沉降量不应大于 200 mm 的要求<sup>[7]</sup>。结果表明, 码头沉降比较均匀, 且最终沉降趋于稳定。观测点竖向沉降位移曲线见图 7。

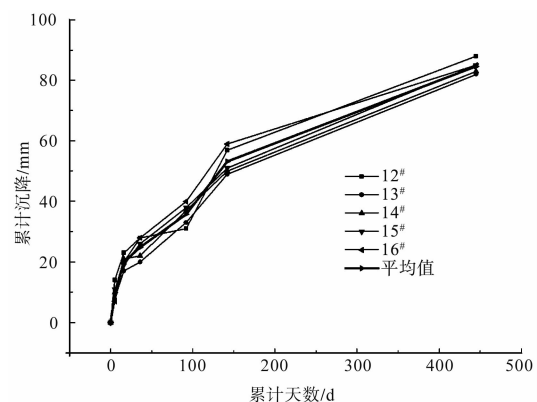


图7 观测点竖向沉降位移曲线

#### 3.2 模拟结果分析

对比实际观测数据、分层总和法和有限差分法数值模拟计算的空心方块底板中点最终沉降量 (依次为 84.60, 81.00, 86.50 mm), 可知, 计算结果与实际值的偏差在 5% 以内, 从而验证了两种计算方法在类似地质条件下的适用性, 选取的关键参数可用于指导类似工程的沉降预测计算。

### 4 结论

1) 分层总和法计算的沉降量与经验系数的选取有很大联系, 本区域经验系数  $m_s$  取为 0.7, 计算的沉降量与实际数据比较吻合, 建议后期加强相似土层经验系数的整理汇总, 为今后的分析提

供可靠的依据。

2) 有限差分法计算的沉降量与变形模量的选取有很大联系, 本区域选取  $E_0 = 5E_s$ , 计算的沉降量与实际数据比较吻合, 同时变形模量的选取应建立在详尽的地质勘察资料和地区土力学经验参数基础上。

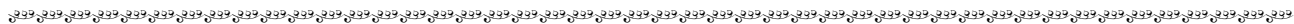
#### 参考文献:

- [1] 苏航. 河北海事局曹妃甸海事工作船码头工程初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2008.
- [2] 陈祥福. 沉降计算理论及工程实例[M]. 北京: 科学出版

社, 2005.

- [3] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范[S].
- [4] 交通部第一航务工程勘察设计院. 海港工程设计手册[M]. 北京: 交通出版社, 1994.
- [5] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [6] 高大钊, 袁聚云. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [7] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 147 页)

由表 1 可知, 在第 1~3 台阶上检修工况的压应力值比低水工况下大, 在第 4 台阶上距左端 4 m 以后, 低水工况下的压应力值比检修大。这是由于在低水工况下, 墙前存在水压力, 使竖墙上的摩擦力增大, 竖墙上承担了部分竖直向下的力, 并且在竖墙摩擦力和水压力的作用下, 台阶上的应力出现了重新分布。

### 3 结论

1) 岩基上的倒梯形衬砌闸墙, 结构薄弱点为衬砌墙的台阶处, 较大的拉应力易导致衬砌墙开裂。且检修工况比低水工况更甚。

2) 在两种工况下, 竖墙接触面上的切应力呈上端较大, 中部较小, 下端反向增长的分布状态; 台阶上的切应力基本为先逐渐增大, 后突然减小的趋势。

3) 台阶上基岩和闸墙的接触压应力多呈抛物线型分布, 与传统解析法采用的线性假设有很大差异。

4) 在检修和低水工况下, 倒梯形高衬砌闸墙各台阶与基岩均为粘结接触状态, 各级竖墙除在顶部与基岩呈剪切转移状态外, 中部和底部也为粘结状态。

#### 参考文献:

- [1] 陈作强, 卢文蕾, 陈艳梅, 等. 山区河流船闸衬砌式闸墙结构计算研究[J]. 水运工程, 2005(4): 75-78, 89.
- [2] 潘美元. 软基上坞式船闸闸室结构受力性能和可靠度研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2007.
- [3] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [4] 兰晓妮. 船闸闸室结构施工过程有限元仿真分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [5] 桑雷. 株洲航电枢纽复杂地基基础处理方案研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
- [6] 曹周红. 不同施工过程对坞式船闸结构影响的仿真模拟研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2005.
- [7] 谢贻权. 弹性和塑性力学中的有限单元法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [8] 王丽军. 船闸结构内力的分析与研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [9] 何本国. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [10] 邓凡平. ANSYS10.0 有限元分析自学手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [11] 作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利水电出版社, 1992.

(本文编辑 武亚庆)