

重力式码头抗滑、抗倾稳定性可靠指标 计算及程序实现

贡金鑫¹, 麦远俭², 王利欢¹

(1. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 中交集团第四航务工程局, 广东 广州 510230)

摘要: 自1998年起,《重力式码头设计施工规范》(JTJ290-98)就采用了基于可靠度的设计方法,提高了我国重力式码头的设计水平. 为进一步推动可靠度理论的应用,新修订的《重力式码头设计施工规范》附录D给出了重力式码头抗滑、抗倾稳定性按可靠指标的设计方法. 本文介绍了相关的专题研究和编制的可视化计算程序. 并利用该程序对我国已建的十几座码头进行了稳定性可靠度分析,计算得到的可靠指标具有一定规律性.

关 键 词: 重力式码头; 稳定性; 可靠指标; 计算程序

中图分类号: U656.1.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)04-0008-06

Reliability analysis of sliding and overturning stability of gravity quay and computing program

GONG Jin-xin¹, MAI Yuan-jian², WANG Li-huan¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Fourth Navigational Engineering Bureau of CCGC, Guangzhou 510230, China)

Abstract: The “Design and Construction Code for Gravity Quay”, issued in 1998, having adopted reliability-based methods, improves the design Level of harbor engineering structures. In order to promote the application of reliability theory, the Appendix D of the new version of the code proposes a reliability index method for design of the sliding and overturning stability of the gravity quay. This paper introduces the relevant special research and the corresponding visualized program. The stability reliability of some ten gravity quays has been analyzed using the program. The reliability index obtained from calculation shows some regularity.

Key words: gravity quay; stability; reliability index; computing program

重力式码头具有施工快、投资省、寿命长、维修简单、对使用荷载适应性强等优点,在我国现有的码头中占半数以上. 调查研究表明,重力式码头失事很大一部分是由于抗滑、抗倾能力不足所致. 因此,抗滑、抗倾稳定性是重力式码头承载能力设计的重要内容^[1].

收稿日期: 2008-01-25

作者简介: 贡金鑫(1964-),男,河北衡水人,教授,主要从事工程结构设计理论的研究. E-mail: gong_jx_vip@eyou.com

早已证明码头稳定性设计中传统的安全系数法存在诸多弊端.自1998年起,我国的《重力式码头设计与施工规范》^[2-4]就采用以概率理论为基础以分项系数表示的设计方法,所采用的分项系数经可靠度校准,提高了我国码头结构设计的水平.但由于重力式码头设计计算复杂,而按可靠指标设计又要进行多次迭代,计算量大,为此编制了重力式码头抗滑、抗倾稳定性的可靠指标计算程序^[5].

1 不确定性因素及概率分布

重力式码头在设计使用年限内是否发生滑移或倾覆破坏是不确定事件,可用随机变量来描述不确定性因素,包括码头面均布荷载 q ,混凝土的重度 γ_c ,中砂重度 γ_s ,墙后填块石的内摩擦角 φ_r ,墙后填砂内摩擦角 φ_s ,码头上部结构与基床顶面的摩擦系数 f ,主动土压力计算模式的不确定系数 K_{p1} 以及抗倾覆力矩计算模式的不确定性系数 K_{p2} 等.对于墙背与墙后填砂或填石的外摩擦角 δ ,按规范^[2]采用内摩擦角的倍数.这些变量的概率分布和统计参数见表1.将这些变量表示为 X ,则其平均值和标准差为:

$$\mu_X = k_X X_k, \quad \sigma_X = \mu_X \delta_X \quad (1)$$

式中: X_k 为 X 的标准值,按《重力式码头设计与施工规范》确定; k_X 为 X 的平均值与标准值的比值; δ_X 为 X 的变异系数.

表1 变量的概率分布和统计参数

Tab.1 Probability distribution and statistical parameters of random variables

变 量	标准值 X_k	$k_X = \frac{\mu_X}{X_k}$	变异系数 δ_X	概率分布
码头面均布荷载(kN/m ²)	50年	0.78	0.14	极值Ⅰ型
	1年	0.45	0.244	
混凝土重度(kN/m ³)	23.0	1.03	0.02	正态
钢筋混凝土重度(kN/m ³)	24.0	1.02	0.02	正态
中砂重度(kN/m ³)	18.0	1.07	0.03	正态
中砂内摩擦角(°)	32.0	1.04	0.05	正态
块石重度(kN/m ³)	18.0	1.0	0	定值
块石内摩擦角(°)	45	0.99	0.06	正态
混凝土与抛石基床间摩擦系数	0.6	1.0	0.044	正态
主动土压力计算模式不确定性系数	1.0	1.0	0.02	正态
抗倾力矩计算模式不确定性系数	1.0	0.897	0.071	正态

2 抗滑、抗倾稳定性可靠度分析

对重力式码头进行抗滑、抗倾可靠度分析,首先应建立其功能函数^[6,7].功能函数可根据规范中的设计表达式建立,需将有关的变量视为随机变量,并考虑计算公式的不精确性.

重力式码头沿计算面抗滑稳定性的功能函数可表示为:

$$Z = (G + K_{p1}E_V + E_{qV})f - (K_{p1}E_H + E_{qH} + P_{RH}) \quad (2)$$

式中: G 为作用在计算面上的码头结构自重(kN); f 为沿作用面的摩擦系数; E_H, E_V 为计算面以上永久作用主动土压力的水平分力和竖向分力(kN); E_{qH}, E_{qV} 为计算面以上可变作用总主动土压力的水平分力和竖向分力(kN); P_{RH} 为系缆力水平分力(kN); K_{p1} 为主动土压力计算模式不确定性系数.

重力式码头对计算面前趾抗倾稳定性的功能函数可表示为:

$$Z = K_{p2}(M_G + K_{p1}M_{E_V} + M_{E_{qV}}) - (K_{p1}M_{E_H} + M_{E_{qH}} + M_{PR}) \quad (3)$$

式中: M_G 为结构自重对计算面前趾的稳定力矩(kN·m); M_{E_H}, M_{E_V} 分别为永久作用总主动土压力的水平分力

与竖向分力对计算面前趾的倾覆力矩和稳定力矩($\text{kN}\cdot\text{m}$); $M_{E_{qH}}, M_{E_{qV}}$ 分别为可变作用总主动土压力的水平分力与竖向分力对计算面前趾的倾覆力矩和稳定力矩($\text{kN}\cdot\text{m}$); M_{PR} 为系缆力对计算面前趾的倾覆力矩($\text{kN}\cdot\text{m}$); K_{P2} 为抗倾覆力矩计算模式不确定性系数。

图 1 为常用的 3 种重力式码头的断面图. 下面以方块式码头为例说明(2)和(3)式中各变量的计算方法. 扶壁式和沉箱式码头的计算类似。

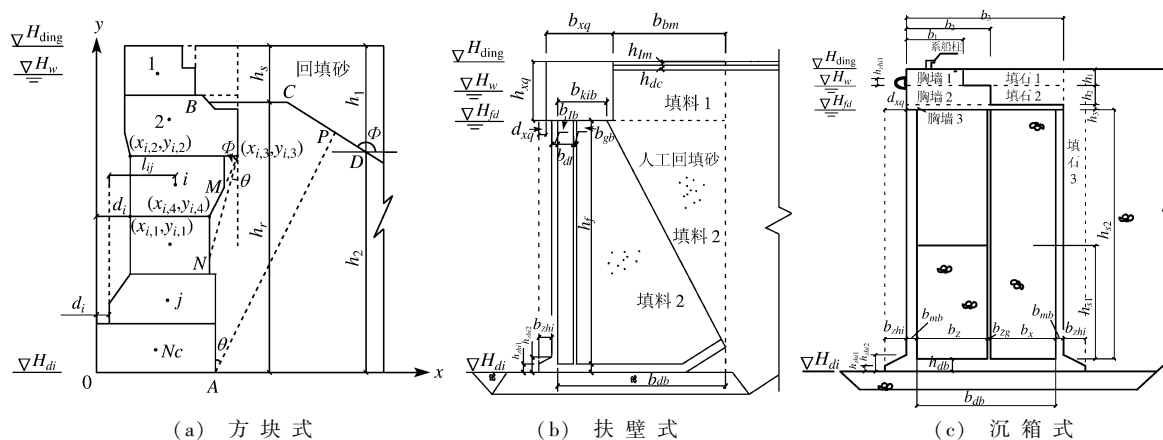


图 1 3 种重力式码头的断面图

Fig. 1 Sectional views of three kinds of gravity quays

对于方块式重力码头的抗滑计算,根据图 1,可确定码头各部分的重量 $G_i = V_i \gamma_i$, E_H 和 E_{qH} 分别按下式计算

$$E_{Hn} = 0.5 \times \left(2 \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i h_i + \gamma_n h_n \right) K_{an} \cos(\alpha + \delta_n) \quad (4)$$

$$E_{qHn} = q K_q K_{an} h_n \cos(\alpha + \delta_n) \quad (5)$$

式中:主动土压力系数 $K_{an} = \frac{\cos^2(\varphi_n - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\alpha + \delta_n) \left[1 + \frac{\sin(\varphi_n + \delta_n) \sin(\varphi_n - \beta)}{\cos(\alpha + \delta_n) \cos(\alpha - \beta)} \right]^2}$; α 为墙背与铅垂线的夹角($^\circ$); β 为地面与水平面的夹角($^\circ$); γ_i 为第 i 层土的重度(kN/m^3); h_i 为第 i 层土的厚度(m); δ_n 为第 n 层填料与墙背的夹角($^\circ$); 系数 $K_q = \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha - \beta)}$ 。

E_V 和 E_{qV} 分别按下式计算

$$E_V = E_H \tan \delta, \quad E_{qV} = E_{qH} \tan \delta \quad (6)$$

对于方块式重力码头的抗倾计算,可将上述作用力与各自力臂相乘求得。

根据功能函数(2)和(3),及上面各式表示的变量,可采用当量正态化方法(JC 法),即首先将非正态随机变量进行当量正态化,求出当量正态化的均值和标准差,然后再用改进的一次二阶矩方法计算可靠指标。JC 法的基本公式及迭代方法见文献[6,7]。

3 程序实现

根据上述功能函数及变量参数,在进行“重力式码头抗滑、抗倾稳定性按可靠指标设计”的专题研究时,用 FORTRAN 语言编写了重力式码头抗滑、抗倾稳定性可靠指标计算程序^[5],并用 VB 语言对程序进行了可视化改造,使得程序能够运用在类似 Windows 的窗口中,采用人机对话方式进行数据输入、修改和断面绘制,具有界面友好、使用方便的特点. 计算机辅助设计程序具有如下功能:①边界条件和原始数据的图形界面录入;②数值计算:自重、土压力、系缆力、剩余水压力以及各力引起的码头稳定或者倾覆力矩大小;③按照规

范要求,利用分项系数法验算码头抗滑、抗倾稳定性;④按照 JC 法步骤,迭代计算码头抗滑、抗倾稳定性可靠指标;⑤计算书生成。

在程序主界面选择要计算的重力式码头型式.下面着重介绍沉箱码头的程序框图及使用方法,方块码头和扶壁码头类似.沉箱码头抗滑、抗倾可靠指标计算及按规范设计验算的程序结构如图 2 所示。

沉箱码头主界面见图 3. 按要求输入沉箱几何尺寸、计算条件等信息,并指定计算方法. 点击“码头几何尺寸设计”按钮,链接到码头尺寸设计界面(见图 4),可完成输入沉箱码头各部分几何尺寸、同一断面上箱体个数以及沉箱内填石高度等信息任务. 点击“码头计算条件设计”按钮,链接到码头计算条件设计界面(见图 5),可输入作为定值处理的材料参数以及水位条件、系统缆力数值,并指定码头后填料类型. 点击“修改随机变量默认值”按钮,链接到图 6 所示界面,可针对具体工程,完成对随机变量个数及各随机变量统计参数默认值的修改。

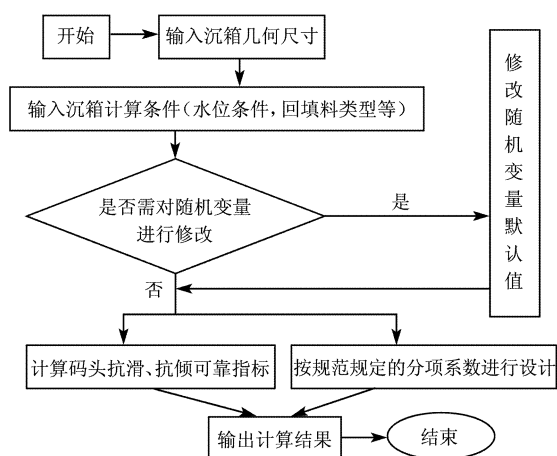


图 2 沉箱码头主程序流程

Fig. 2 Flow chart of the main program of caisson quay

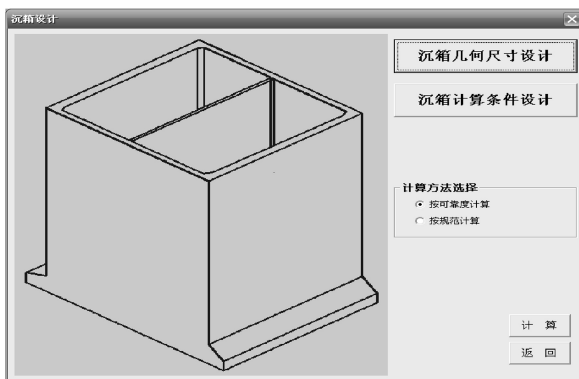


图 3 沉箱码头设计程序主界面

Fig. 3 Main interface of the design program of caisson quay

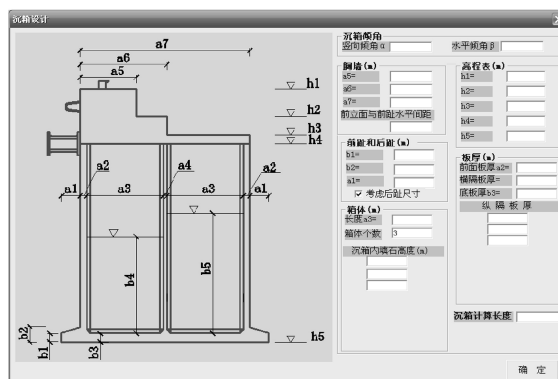


图 4 码头几何尺寸输入界面

Fig. 4 Input interface of the geometric size of caisson quay



图 5 码头计算条件设计界面

Fig. 5 Design interface of the calculation conditions of caisson quay



图 6 随机变量默认值修改界面

Fig. 6 Interface of the default value modification of random variables

4 工程实例计算

本文选取了我国已建的十几座码头进行抗滑、抗倾稳定性可靠度分析,其中包括 1 座方块式码头,2 座扶壁式码头和 9 座沉箱式码头. 目前停泊大吨位轮船的深水港口广泛采用巨型沉箱码头,为此特别针对这种形式的码头按墙后回填块石和回填中砂两种工况进行研究. 表中“原断面”指原设计图纸的断面,“调整后断面”是指对原设计图纸的断面尺寸按相同的比例缩减,直到抗滑、抗倾稳定性刚好满足《重力式码头设计与施工规范》(JTJ 290-98)规定的要求. 计算结果见表 2~5(其中表 2 中相应水位为 5.5 m).

表 2 方块式码头稳定性可靠指标计算结果

Tab. 2 Calculation results of the stability reliability of concrete block quays

工 程 名 称	层 数	抗滑稳定性可靠指标		抗倾稳定性可靠指标	
		原断面	调整后断面	原断面	调整后断面
湛 江 三 区 矿 砂 码 头	1	3.459	—	1.701	0.788
	2	8.190	4.539	10.108	9.205
	3	9.581	5.797	8.683	7.451
	4	10.237	5.662	6.875	5.417
	5	9.863	4.810	5.900	4.310
	6	9.134	4.072	6.302	4.842
	7	8.346	3.290	6.363	4.943
	8	8.434	3.288	6.175	4.749

表 3 扶壁式码头稳定性可靠指标计算结果

Tab. 3 Calculation results of the stability reliability of counterforted quays

工 程 名 称	水位/ m	抗滑稳定性可靠指标		抗倾稳定性可靠指标	
		原断面	调整后断面	原断面	调整后断面
广州海运局菠萝庙航修站码头	107.0	6.033	4.777	6.926	4.899
广州东莞海昌煤码头	3.05	8.754	4.651	10.339	4.817
广州海关南沙海查基地码头 1-1 断面	6.47	6.254	4.488	7.441	4.742
广州海关南沙海查基地码头 2-2 断面	6.47	7.190	4.503	8.691	4.740
平均可靠指标		—	4.605	—	4.798

表 4 沉箱式码头稳定性可靠指标计算结果(回填块石)

Tab. 4 Calculation results of the stability reliability of caisson quays (riprap backfilled)

工 程 名 称	水位/ m	抗滑稳定性可靠指标		抗倾稳定性可靠指标	
		原断面	调整后断面	原断面	调整后断面
秦皇岛港二期工程	1.77	10.428	2.406	11.024	3.014
烟台港三期工程	2.64	8.411	2.310	8.248	2.920
福州港江阴港区 4、5 泊位工程	7.45	11.317	2.244	10.618	2.961
厦门港海沧港区一期工程	6.04	9.189	2.278	8.320	2.994
广州南沙集装箱码头	3.24	10.804	2.310	10.648	2.937
厦门港嵩屿港区二期工程	6.14	10.086	2.305	10.120	3.063
深圳港大铲湾区集装箱码头一期工程	3.04	9.027	2.253	9.112	2.917
漳州港某港区 7、9 泊位工程	6.14	9.730	2.313	9.748	2.993
澳门九澳深水港货柜码头二期扩建工程	1.45	7.710	2.416	7.860	3.077
平均可靠指标		—	2.315	—	2.986

表5 沉箱式码头稳定性可靠指标计算结果(回填中砂)

Tab.5 Calculation results of the stability reliability of caisson quays (medium sand backfilled)

工程名称	水位/m	抗滑稳定性可靠指标		抗倾稳定性可靠指标	
		原断面	调整后断面	原断面	调整后断面
秦皇岛港二期工程	1.77	8.817	3.617	9.688	4.260
烟台港三期工程	2.64	6.513	3.554	6.429	4.192
福州港江阴港区4,5泊位工程	7.45	10.176	3.498	9.744	4.183
厦门港海沧港区一期工程	6.04	7.659	3.434	6.767	4.145
广州南沙集装箱码头	3.24	9.321	3.492	9.323	4.202
厦门港嵩屿港区二期工程	6.14	8.669	3.507	8.792	4.227
深圳港大铲湾区集装箱码头一期工程	3.04	7.286	3.572	7.557	4.249
漳州港某港区7,9泊位工程	6.14	8.280	3.524	7.324	4.451
澳门九澳深水港货柜码头二期扩建工程	1.45	5.846	3.751	6.117	4.333
平均可靠指标		—	3.550	—	4.249

5 结 语

(1)按本文选取的码头原断面进行计算,码头抗滑、抗倾可靠指标都较大(普遍大于6).这主要是由于没有考虑波浪力的影响;

(2)方块式码头的抗滑、抗倾稳定性,其可能的最危险滑移、倾覆破坏面不一定出现在码头与抛石基床的交界面,也可能出现在胸墙、混凝土块、卸荷体等交界面处.因此,应对各水平缝的稳定性进行校核,以满足最不利工况.必要时采取一定的构造措施;

(3)码头墙身后回填料类型对沉箱式码头抗滑、抗倾可靠指标影响很大.调整断面后,当码头后回填块石时抗滑稳定可靠指标约为2.3,回填中砂时约为3.5;当码头后回填块石时抗倾稳定可靠指标约为3.0,回填中砂时约为4.2左右;

(4)对于扶壁码头,调整断面后其抗滑、抗倾稳定可靠指标大致相等;

(5)基本随机变量统计参数对于计算结果的影响明显,尤其以填料内摩擦角影响为甚.因此,正确获得统计资料非常重要;

(6)由于没有波浪力的统计资料,本文的程序没有考虑波浪力的影响.有必要以后做进一步的工作,获得波浪力的统计参数,进一步完善计算程序.

参 考 文 献:

- [1] 邱 驹. 港工建筑物[M]. 天津:天津大学出版社,2002:53-112.
- [2] JTJ290-98,重力式码头设计与施工规范[S].
- [3] GB50158-92,港口工程结构可靠度设计统一标准[S].
- [4] 《港口工程结构可靠度设计统一标准》编制组. 港口工程结构可靠度[M]. 北京:人民交通出版社,1992.
- [5] 贡金鑫,麦远俭,王利欢,等. 重力式码头抗滑、抗倾稳定性按可靠指标设计的研究[R]. 大连:大连理工大学,2006.
- [6] 贡金鑫. 工程结构可靠度计算方法[M]. 大连:大连理工大学出版社,2003.
- [7] 贡金鑫,魏巍巍. 工程结构可靠性设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,2007.