

扶壁式坞墙稳定性可靠度分析和分项系数法设计

高树飞¹, 贡金鑫¹, 刘永绣², 赵晓岚², 杜建圣²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222)

摘要:可靠度校准是分析按规范设计的结构的可靠度,分析的是规范规定的结构安全度水平;分项系数设计法采用多个系数反映设计中各变量存在的不确定性,设计的结构比采用单一安全系数法具有更好的可靠度一致性,因此更为合理。结合《干船坞设计规范(水工结构)》(JTJ 252-87)的修订,对扶壁式坞墙稳定性进行了可靠度校准和分项系数法设计。提出了扶壁式坞墙抗滑和抗倾稳定性的设计可靠指标,给出了扶壁式坞墙抗滑和抗倾稳定性验算的分项系数表达式和分项系数的建议值。分析表明,按现行《干船坞设计规范(水工结构)》(JTJ 252-87)设计的扶壁式坞墙抗滑和抗倾稳定性的可靠指标分别为3.1和3.8。根据这一校准结果,确定扶壁式坞墙抗滑和抗倾稳定性验算表达式中的抗力分项系数分别为1.00和1.30。

关键词:扶壁式坞墙;抗滑稳定性;抗倾稳定性;可靠度;分项系数

中图分类号:U673.33

文献标志码:A

文章编号:1009-640X(2014)02-0017-09

坞墙是干船坞的重要组成部分之一,其常用的结构型式有重力式、桩基承台式、衬砌式、混合式和板桩式等。在土压力、墙前后水压力、渗透压力、浮托力等的作用下,坞墙除具有足够的强度外,还需有足够的抗滑和抗倾稳定性。目前,水运工程中已对各种码头结构的可靠度进行了一定的研究^[1-8],在研究成果的基础上采用了分项系数设计方法。现行的《干船坞设计规范(水工结构)》(JTJ 252-87)中的重力式坞墙抗滑、抗倾稳定性是按安全系数方法设计的,有关干船坞可靠度的研究还很少。本文针对干船坞设计规范的修订,对扶壁式坞墙的抗滑、抗倾稳定性进行可靠度分析,提出了相应的分项系数设计方法。另外,不同于码头结构,干船坞坞墙前后的水压力较大,水压力分项系数不宜参照码头结构规范选取,应予以提高,本文通过计算提出合适的水压力系数。

可靠度校准是分析按规范设计的结构的可靠度,分析的是规范所规定的安全度水平。分项系数设计法采用多个系数反映设计中各变量存在的不确定性,设计的结构比采用单一安全系数法具有更好的可靠度一致性,因此更为合理。分项系数设计表达式中分项系数的确定是以对单一安全系数设计方法可靠度校准为基础的。本文在进行扶壁式坞墙稳定性的相关计算中,仅考虑对坞墙稳定性起控制作用的荷载,并按最不利情况进行荷载组合。

1 扶壁式坞墙稳定性极限状态方程和变量统计特性

1.1 极限状态方程

对结构进行可靠度分析,首先要建立结构的极限状态方程。极限状态方程以数学公式的形式描述了结构破坏的临界状态。扶壁式坞墙抗滑稳定性的极限状态方程为:

收稿日期:2013-08-30

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(20113288231510)

作者简介:高树飞(1989-),男,安徽蚌埠人,博士研究生,主要从事港口工程结构设计与抗震研究。

E-mail: gaosf1989@qq.com

$$Z_1 = (G - P_U - P_S)f + mE_P K_{P1} - [(E_H + E_{qH})K_{P2} + P_W] = 0 \quad (1)$$

式中: G 为作用于墙底的结构全部自重; P_U 为作用于坞墙的浮托力; P_S 为作用于坞墙的渗透压力; f 为混凝土与强风化岩间的摩擦系数; m 为折减系数, 取 0.30; E_P 为作用于坞墙的被动土压力; E_H 为作用于坞墙的永久作用主动土压力; E_{qH} 为可变作用引起的主动土压力; P_W 为作用于坞墙的剩余水压力; K_{P1} 和 K_{P2} 分别为被动土压力和主动土压力计算模式的不确定系数。

扶壁式坞墙抗倾稳定性的极限状态方程为:

$$Z_2 = (M_G + mM_{E_P} K_{P1})K_{P3} - [(M_{E_H} + M_{E_{qH}})K_{P2} + M_{P_W} + M_{P_U} + M_{P_S}] = 0 \quad (2)$$

式中: M_G 为结构全部自重对计算面前趾的稳定力矩; m 为折减系数, 也取 0.30; M_{E_P} 为被动土压力对计算面前趾的稳定力矩; K_{P3} 为稳定力矩计算模式的不确定系数; M_{E_H} 为永久作用主动土压力对计算面前趾的的倾覆力矩; $M_{E_{qH}}$ 为可变作用主动土压力对计算面前趾的的倾覆力矩; M_{P_W} 为剩余水压力对计算面前趾的倾覆力矩; M_{P_U} 为浮托力对计算面前趾的倾覆力矩; M_{P_S} 为渗透压力对计算面前趾的倾覆力矩。各荷载的分布见图 1 所示。

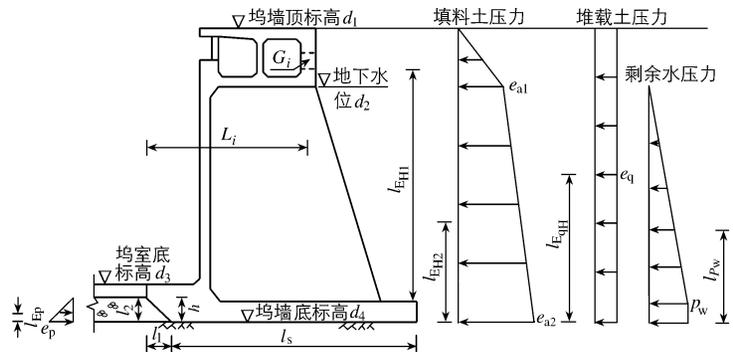


图 1 荷载分布

Fig. 1 Load distribution

1.2 各变量的计算方法

1.2.1 结构自重及产生的稳定力矩 对于坞墙的抗滑、抗倾稳定性, 其自重为有利作用, 属于坞墙抗滑、抗倾的抗力因素。坞墙每延米结构的自重可按下式计算:

$$G_i = V_i \gamma_i \quad (3)$$

式中: G_i 为坞墙部位 i 每延米的自重 (kN/m); V_i 为坞墙部位 i 每延米的体积 (m^3); γ_i 为坞墙部位 i 的材料重度 (kN/m^3)。

坞墙每延米结构自重产生的稳定力矩按下式计算:

$$M_{Gi} = L_i G_i = L_i V_i \gamma_i \quad (4)$$

式中: M_{Gi} 为坞墙部位 i 每延米自重产生的稳定力矩 ($kN \cdot m/m$); L_i 为部位 i 重心到计算面前趾的距离 (m)。

每延米结构自重 G_i 和稳定力矩 M_{Gi} 的计算结果是以混凝土重度 γ_c 和中砂重度 γ_s 的函数形式表示的, 是因为进行可靠度分析时, 材料重度均视为随机变量, 不是确定的值。当计算坞墙每延米结构自重和稳定力矩的标准值时, 将 γ_c 和 γ_s 分别以其标准值 γ_{ck} 和 γ_{sk} 代替即可。

1.2.2 土压力及产生的稳定力矩

(1) 主动土压力 主动土压力是使船坞结构滑动或倾覆的因素, 属于荷载效应。根据文献[9], 坞墙背面砂土自身和堆载引起的主动土压力强度可分别按下列公式计算:

$$e_a = \left(\sum \gamma_i h_i \right) K_a \cos \alpha \quad (5)$$

$$e_q = q K_a \cos \alpha \quad (6)$$

式中: e_a 为计算点处砂土自身引起的主动土压力 (kPa); e_q 为堆载引起的主动土压力 (kPa); q 为地面均布荷载 (kPa); γ_i 和 h_i 分别为计算点以上各土层的重度 (kN/m^3) 和厚度 (m); K_a 为计算点主动土压力系数, 按下式计算:

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\alpha + \delta) \left(1 + \frac{\sin(\varphi + \delta) \sin \varphi}{\cos(\alpha + \delta) \cos \alpha} \right)^2} \quad (7)$$

式中: α 为墙背与铅垂线的夹角; φ 为计算点的内摩擦角; δ 为计算点的外摩擦角, 按文献[9]确定。

当墙背较平坦且墙背粗糙或出现第二破裂面时, 砂土的主动土压力强度按作用在通过后趾的假想垂直

面上的水平土压力强度计算:

$$e_a = \left(\sum \gamma_i h_i \right) K_a \quad (8)$$

$$e_q = qK_a \quad (9)$$

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (10)$$

墙后填料土压力合力 E_H 及其对计算面前趾的倾覆力矩 M_{E_H} 为

$$E_H = 0.5e_{a1}(d_1 - d_2) + 0.5(e_{a1} + e_{a2})(d_2 - d_4) \quad (11)$$

$$M_{E_H} = 0.5e_{a1}(d_1 - d_2)l_{E_{H1}} + 0.5(e_{a1} + e_{a2})(d_2 - d_4)l_{E_{H2}} \quad (12)$$

式中: e_{a1} 和 e_{a2} 分别为墙后地下水位和墙底处的主动土压力水平强度; $l_{E_{H1}}$ 和 $l_{E_{H2}}$ 分别为填料地下水位以上和以下部分土压力合力作用点至墙底面的距离。

墙后堆载土压力合力 E_{qH} 及其对计算面前趾的倾覆力矩 $M_{E_{qH}}$ 为

$$E_{qH} = e_q(d_1 - d_4) \quad (13)$$

$$M_{E_{qH}} = e_q(d_1 - d_4)l_{E_{qH}} \quad (14)$$

式中: e_q 为堆载产生的主动土压力水平强度; $l_{E_{qH}}$ 为堆载土压力合力至墙底面的距离。

(2) 被动土压力 被动土压力是抵抗船坞坞墙滑动或倾覆的因素,属于抗力。根据文献[9],坞墙前面黏性土或砂土($c=0$)的被动土压力强度可按下式计算:

$$e_p = \left(q + \sum \gamma_i h_i \right) K_p + 2c\sqrt{K_p} \quad (15)$$

式中: e_p 为计算点的被动土压力强度(kPa); c 为计算点处土的黏聚力(kPa); K_p 为计算点处被动土压力系数,按下式计算:

$$K_p = \frac{\cos^2(\varphi + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\alpha - \delta) \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin \varphi}{\cos(\alpha - \delta) \cos \alpha}} \right)^2} \quad (16)$$

对无黏性填料,当地面水平且墙前无超载时,墙前被动土压力强度标准值也可按下式计算:

$$e_p = \left(\sum \gamma_i h_i \right) K_p \quad (17)$$

$$K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (18)$$

墙前被动土压力合力 E_p 及其对计算面前趾的倾覆力矩 M_{E_p} 为

$$E_p = 0.5e_p h, \quad M_{E_p} = 0.5e_p h l_{E_p} \quad (19)$$

式中: e_p 为墙前墙底处的被动土压力水平强度; h 为墙前土体高度; l_{E_p} 为墙前被动土压力合力作用点至墙底面的距离。

同自重一样,土压力及产生的对计算面前趾的力矩是以地面均匀荷载 q 、材料重度和土内摩擦角 φ 的函数形式表示的,是因为进行可靠度分析时, q 、材料重度和 φ 均视为随机变量,不是确定的值。当计算土压力及产生的力矩的标准值时,将变量以其标准值代替即可。

1.2.3 剩余水压力及产生的倾覆力矩 作用于坞墙的剩余水压力是使船坞滑动或倾覆的因素,属于荷载效应,按静水压力计算。作用于坞墙的剩余水压力 P_w 及其对计算面前趾的倾覆力矩 M_{P_w} 可按下列公式计算:

$$P_w = 0.5p_w(d_2 - d_4 - h) + p_w h, \quad M_{P_w} = P_w l_{P_w} \quad (20)$$

式中:墙后剩余水压力强度 $p_w = \gamma_w(d_2 - d_4 - h)$, γ_w 为水的重度; l_{P_w} 为剩余水压力合力作用点至墙底面的距离。

不同于结构自重和土压力,在进行可靠度分析时,剩余水压力及产生的倾覆力矩是按常值处理的,直接使用其标准值进行可靠指标的计算。

1.2.4 扬压力及产生的倾覆力矩 扬压力是增大船坞滑动或倾覆的因素,对坞墙的稳定性不利,属于荷载

效应。作用于坞墙底面的浮托力按低水位一侧的水位计算。对于作用于坞墙底面的渗透压力,底面高水位一侧取全水头,低水位一侧取零,其间根据渗透轮廓按直线或折线相连。

渗透轮廓换算渗径总长度 L 的计算公式如下:

$$L = \sum l_s + m \sum l_c + \sum l_x \quad (21)$$

$$l_x = \sqrt{l_1^2 + (ml_2)^2} \quad (22)$$

式中: l_s 为渗透轮廓的水平段长度; m 为换算系数,对单排板桩取 1.5,对多排板桩取 2.0; l_c 为渗透轮廓的垂直段长度; l_x 为渗透轮廓的倾斜段换算长度; l_1 为渗透轮廓倾斜段的水平投影长度; l_2 为渗透轮廓倾斜段的垂直投影长度。在进行可靠度分析时,扬压力及产生的对计算面前趾的倾覆力矩是按常值处理的,直接使用其标准值进行可靠指标的计算。

1.3 变量的概率分布和统计参数

前面叙述了坞墙极限状态方程中抗滑和抗倾计算中的作用和抗力的表达式计算方法,作用和抗力的概率分布和统计参数分别如表 1 和表 2 所示。表中,均值系数为变量平均值与标准值的比值,变异系数为标准差与平均值的比值。对于变量 X ,其标准值用 X_k 表示,则 X 的平均值 μ_X 和标准差 σ_X 与其均值系数 k_X 和变异系数 δ_X 间具有如下关系:

$$\mu_X = k_X X_k, \quad \delta_X = \sigma_X / \mu_X \quad (23)$$

表中的各计算模式不确定性系数指理论计算模型计算结果与真实结果间的不确定性,根据理论模型计算结果与试验结果的比值确定,一般将该比值视为随机变量,认为其服从正态分布。扶壁式坞墙的结构形式和工作状态与扶壁式重力式码头类似,所以表中的计算模式不确定性系数参考的是重力式码头可靠度分析的统计参数^[12]。

表 1 中堆载的统计参数为 50 年使用期最大值的概率分布和统计参数,采用的是《重力式码头设计与施工规范》(JTS 167-2-2009)中港口码头堆载的参数值;同理,混凝土重力密度、中砂水上和水中重力密度和中砂内摩擦角参考的是重力式码头可靠度分析的统计参数,部分变量的标准值针对算例进行了调整。

表 1 作用的概率分布和统计参数

Tab. 1 Probability distributions and statistical parameters of action

类 型	标准值	统计参数				概率分布
		均值系数 k	变异系数 δ	平均值 μ	标准差 σ	
堆载 q (kPa)	20	0.78	0.14	15.6	2.2	极值 I 型
中砂水上重度 γ_s (kN/m ³)	18.0	1.07	0.03	19.2	0.62	正态
中砂水下重度 γ'_s (kN/m ³)	9.5	1.01	0.03	9.6	0.30	正态
中砂内摩擦角 φ (°)	32.0	1.04	0.05	33.3	1.8	正态
主动土压力计算模式不确定性系数 K_{p2}	1.0	1.0	0.02	1.0	0.02	正态

表 2 抗力的概率分布和统计参数

Tab. 2 Probability distributions and statistical parameters of resistance

类 型	标准值	统计参数				概率分布
		均值系数 k	变异系数 δ	平均值 μ	标准差 σ	
混凝土水上重度 γ_c (kN/m ³)	24.5	1.02	0.020 5	24.99	0.502	正态
被动土压力计算模式不确定性系数 K_{p1}	1.0	1.0	0.02	1.0	0.02	正态
抗倾力矩计算模式不确定性系数 K_{p3}	1.0	0.897	0.071	0.897	0.064	正态
混凝土与强风化岩间摩擦系数 f	0.7	1.0	0.044	0.7	0.030 8	正态

2 抗滑稳定性可靠度校准和分项系数法设计

2.1 可靠度校准

根据文献[9],考虑最不利荷载组合,按下式验算坞墙沿基底抗水平滑动的稳定性(为与极限状态方程

中的随机变量区别,各变量均加下标“k”):

$$K_s = \frac{(G_k - P_{Uk} - P_{Sk})f_k + mE_{pk}}{E_{Hk} + E_{qHk} + P_{Wk}} \geq 1.30 \quad (24)$$

式中: K_s 为抗滑稳定安全系数。

下面通过一个工程实例计算按单一安全系数法设计的扶壁式坞墙抗滑稳定性可靠指标。图2为山海关船舶重工有限责任公司修船扩建项目4#船坞工程的坞墙结构断面,坞墙为扶壁式坞墙,坞室底标高为-10.0 m,安全等级为二级,计算工况按坞内无水考虑。以该工程断面为基础,改变坞室底标高等和地下水位,得到多个不同情况之后计算不同情况船坞的可靠指标。坞室底标高分别按-7.0,-8.0,-9.0和-10.0 m考虑,墙后地下水位分别按1.0,2.0和3.0 m考虑。另外,分析中考虑设置灌浆帷幕和不设置灌浆帷幕两种情况,设置灌浆帷幕的渗透轮廓如图3所示。各荷载的计算方法如前所述,其中主动土压力和被动土压力强度分别按式(8),(9)和(17)计算;渗透轮廓换算渗径总长度按式(21)和(22)计算,灌浆帷幕可按单排板桩墙处理,有灌浆帷幕时的基底渗透压力分布如图4。

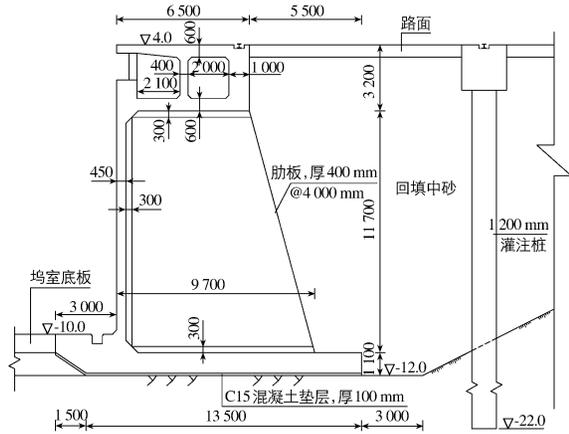


图2 扶壁式坞墙断面(高程单位:m,尺寸单位:mm)
Fig.2 Sectional drawing of counterforted quay wall (elevation unit; m; others: mm)

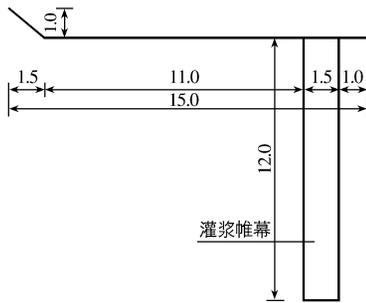


图3 渗透轮廓(单位:m)
Fig.3 Seepage profile (unit: m)

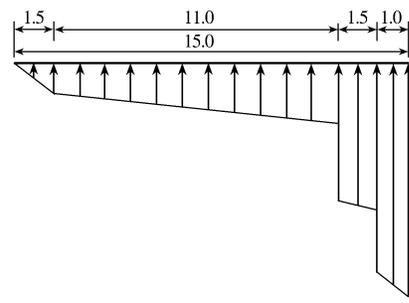


图4 基底渗透压力分布(单位:m)
Fig.4 Seepage pressure distribution on the base (unit: m)

由式(24)计算得到坞墙在不同地下水位、不同坞室底标高时的抗滑稳定安全系数,如表3和表4第3列所示。可见,地下水位越低或坞室底标高越低,坞墙的抗滑稳定安全系数越小。根据式(1)和前文所述的变量统计特征,利用文献[13]中的通用可靠指标计算方法计算坞墙在不同地下水位、不同坞室底标高时的抗滑稳定性可靠指标(见表3和表4)。由表中结果可以看出,可靠指标随地下水位和坞室底标高的变化规律与安全系数相同。

表3和4的坞墙抗滑安全系数和抗滑可靠指标是针对一定的横向尺寸,对于不同的地下水位和不同坞室底标高,安全系数有的能满足文献[9]的要求(即大于等于1.30),有的不能满足要求。需要研究刚好满足文献[9]的安全系数要求时,坞墙抗滑稳定性的可靠指标。为此,对坞墙横向断面尺寸按比例进行缩放,使按式(24)计算的安全系数刚好满足 $K_s = 1.30$,表3和4中的第7列给出了刚好满足规范稳定性要求时的横向缩放系数,表中的第6列给出了相应的可靠指标。由表中结果(调整断面前)可以看出,可靠指标随地下水位和坞室底标高的变化规律与安全系数是相同的;对于有灌浆帷幕和无灌浆帷幕的情况,有灌浆帷幕坞的安全系数和可靠指标均大于无灌浆帷幕坞的安全系数和可靠指标。

表3和4中调整断面后的可靠指标平均值分别为3.0801和3.1584,二者平均值为3.1192,由此确定扶壁式坞墙抗滑稳定性的设计可靠指标为3.10。

表 3 扶壁式坞墙抗滑稳定性的安全系数和可靠指标(有灌浆帷幕)

Tab. 3 Safety factors and reliability indexes of sliding stability (with curtain grouting)

坞室底标高/ m	地下水位/ m	调整断面前		调整断面后		横向缩放系数
		安全系数 K	可靠指标 β	安全系数 K	可靠指标 β	
-7.0	1.0	1.904 278	5.872 051	1.299 996	2.650 859	0.672 64
	2.0	1.726 676	5.562 493	1.300 009	2.984 359	0.743 40
	3.0	1.564 326	5.168 621	1.300 002	3.354 595	0.823 18
-8.0	1.0	1.742 620	5.238 681	1.300 002	2.726 723	0.737 14
	2.0	1.590 262	4.902 167	1.300 002	3.046 174	0.809 84
	3.0	1.450 348	4.481 255	1.299 997	3.396 259	0.891 16
-9.0	1.0	1.605 770	4.630 796	1.300 002	2.795 138	0.802 31
	2.0	1.473 680	4.269 541	1.300 008	3.101 194	0.876 82
	3.0	1.351 863	3.824 382	1.300 007	3.432 843	0.959 59
-10.0	1.0	1.488 504	4.047 793	1.300 004	2.857 074	0.868 11
	2.0	1.372 922	3.663 950	1.299 999	3.150 252	0.944 30
	3.0	1.265 912	3.197 016	1.300 000	3.465 176	1.028 46
平均值					3.080 054	

表 4 扶壁式坞墙抗滑稳定性的安全系数和可靠指标(无灌浆帷幕)

Tab. 4 Safety factors and reliability indexes of sliding stability (without curtain grouting)

坞室底标高/ m	地下水位/ m	调整断面前		调整断面后		横向缩放系数
		安全系数 K	可靠指标 β	安全系数 K	可靠指标 β	
-7.0	1.0	1.610 957	4.494 066	1.299 994	2.725 089	0.810 12
	2.0	1.426 793	3.891 951	1.300 008	3.065 901	0.912 80
	3.0	1.260 988	3.144 434	1.299 997	3.436 428	1.030 29
-8.0	1.0	1.465 071	3.801 778	1.299 999	2.802 506	0.889 24
	2.0	1.307 823	3.181 310	1.300 008	3.127 434	0.994 13
	3.0	1.165 427	2.420 042	1.299 991	3.475 947	1.112 99
-9.0	1.0	1.342 697	3.145 076	1.299 994	2.871 791	0.968 75
	2.0	1.206 918	2.508 732	1.300 000	3.181 746	1.075 62
	3.0	1.083 313	1.736 304	1.299 994	3.510 226	1.195 69
-10.0	1.0	1.238 684	2.521 775	1.300 002	2.934 261	1.048 62
	2.0	1.120 292	1.871 853	1.299 992	3.229 698	1.157 22
	3.0	1.011 997	1.090 626	1.299 997	3.540 137	1.278 39
平均值					3.158 430	

2.2 分项系数法设计

作为水运工程的水工建筑物,扶壁式坞墙的工作原理类似于扶壁式重力码头。因此,参考现行《干船坞设计规范(水工结构)》(JTJ 252-87)中坞墙抗滑稳定性验算的表达式和《重力式码头设计与施工规范》(JTS 167-2-2009)中抗滑稳定性验算的表达式,坞墙抗滑稳定性验算的分项系数表达式可表示为

$$\gamma_0(\gamma_E E_H + \gamma_{P_w} P_w + \gamma_E E_{qH}) \leq \frac{1}{\gamma_R} [(\gamma_G G - \gamma_U P_U - \gamma_S P_S) f + m E_P] \quad (25)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数,取1.0; γ_E 为土压力分项系数; γ_{P_w} 为水压力分项系数; γ_U 为浮托力分项系数; γ_S 为渗透压力分项系数; γ_R 为抗力分项系数。

土压力的分项系数按重力式码头抗滑稳定性的分项系数采用,取为1.35;一般情况下,重力式码头墙后的剩余水压力比较小,分项系数取为1.05,但船坞坞墙有所不同,墙前和墙后水压力合力较大,因此本文按1.05和1.20两种情况考虑。浮托力和渗透压力具有与水压力相近的性质,采用与浮托力和渗透压力相同的分项系数。为保证按分项系数设计法设计的扶壁式坞墙抗滑具有与按《干船坞设计规范(水工结构)》(JTJ 252-87)中的安全系数设计法相同的安全水平,抗力分项系数 γ_R 通过可靠度分析确定。因此,将 γ_R 取

不同的值, 缩放挡墙的横向断面尺寸使挡墙抗滑稳定性恰好满足式(25), 同时计算缩放断面后的抗滑稳定性可靠指标, 计算结果表明, 当 $\gamma_{P_w} = 1.05, \gamma_R = 1.10$ 以及 $\gamma_{P_w} = 1.20, \gamma_R = 1.00$ 时, 挡墙抗滑稳定性的可靠指标近似达到确定的设计可靠指标 3.10。

3 抗倾稳定性可靠度校准和分项系数法设计

3.1 可靠度校准

根据文献[9], 考虑最不利荷载组合, 按下式验算挡墙对墙底面前趾的抗倾稳定性:

$$K_0 = \frac{M_{G_k} + m M_{P_k} - M_{P_{Uk}}}{M_{E_{Hk}} + M_{P_{Wk}} + M_{E_{qHk}} + M_{P_{Sk}}} \geq 1.60 \quad (26)$$

式中: K_0 为抗倾稳定安全系数。

对于图 2 所示的扶壁式挡墙, 由式(26) 计算得到挡墙在不同地下水位、不同挡室底标高时的抗倾稳定安全系数, 如表 5 和 6 第 3 列所示。

表 5 扶壁式挡墙抗倾稳定性的安全系数和可靠指标 (有灌浆帷幕)

Tab.5 Safety factors and reliability indexes of overturning stability (with curtain grouting)

挡室底标高/ m	地下水位/ m	调整断面前		调整断面后		横向缩放系数
		安全系数 K	可靠指标 β	安全系数 K	可靠指标 β	
-7.0	1.0	3.317 838	8.552 196	1.600 006	3.076 693	0.556 32
	2.0	2.986 980	8.183 699	1.600 007	3.420 432	0.596 28
	3.0	2.691 517	7.763 965	1.600 009	3.761 489	0.642 49
-8.0	1.0	3.013 269	8.045 237	1.600 009	3.168 5783	0.605 72
	2.0	2.732 954	7.687 029	1.600 007	3.491 694	0.647 15
	3.0	2.479 269	7.275 651	1.600 008	3.808 726	0.694 55
-9.0	1.0	2.747 699	7.510 613	1.599 993	3.246 412	0.655 67
	2.0	2.507 470	7.159 986	1.600 009	3.554 981	0.698 47
	3.0	2.287 767	6.754 560	1.600 007	3.850 232	0.746 96
-10.0	1.0	2.514 314	6.954 144	1.599 994	3.319 401	0.706 09
	2.0	2.306 496	6.608 178	1.600 009	3.611 451	0.750 16
	3.0	2.114 830	6.206 074	1.600 009	3.887 014	0.799 69
平均值					3.516 425	

表 6 扶壁式挡墙抗倾稳定性的安全系数和可靠指标 (无灌浆帷幕)

Tab.6 Safety factors and reliability indexes of overturning stability (without curtain grouting)

挡室底标高/ m	地下水位/ m	调整断面前		调整断面后		横向缩放系数
		安全系数 K	可靠指标 β	安全系数 K	可靠指标 β	
-7.0	1.0	2.296 036	6.765 847	1.600 008	3.619 369	0.672 75
	2.0	2.066 876	6.173 632	1.600 009	3.933 458	0.743 17
	3.0	1.867 464	5.527 837	1.599 997	4.174 100	0.827 92
-8.0	1.0	2.128 106	6.239 793	1.599 993	3.704 859	0.735 76
	2.0	1.931 457	5.670 491	1.600 008	3.989 177	0.808 49
	3.0	1.757 507	5.045 577	1.600 009	4.204 851	0.894 89
-9.0	1.0	1.978 840	5.699 145	1.599 994	3.778 556	0.799 29
	2.0	1.808 092	5.148 246	1.600 008	4.036 386	0.874 08
	3.0	1.655 017	4.539 905	1.600 009	4.231 012	0.961 96
-10.0	1.0	1.844 814	5.147 082	1.599 999	3.841 881	0.863 18
	2.0	1.695 135	4.610 386	1.599 999	4.076 611	0.939 83
	3.0	1.559 467	4.014 685	1.599 999	4.253 563	1.029 04
平均值					3.986 985	

根据式(2)和前文所述的变量统计特征,利用文献[13]中的通用可靠指标计算方法计算坞墙在不同地下水水位、不同坞室底标高时的抗倾稳定性可靠指标,如表5和6第4列所示。对坞墙横向断面尺寸按比例进行缩放,使按式(26)计算的安全系数刚好满足 $K_0=1.60$,表5和6中的第7列给出了刚好满足规范稳定性要求时的横向缩放系数,表中的第6列给出了相应的可靠指标。

表5和6中调整断面后的可靠指标平均值分别为3.5164和3.9870,二者平均值为3.7517,由此确定抗倾稳定性的设计可靠指标为3.80。

3.2 分项系数法设计

参考文献[9]和[12],扶壁式坞墙抗倾稳定性的分项系数表达式可表示为

$$\gamma_0(\gamma_E M_{E_H} + \gamma_{P_W} M_{P_W} + \gamma_E M_{E_{qH}} + \gamma_S M_{P_S}) \leq \frac{1}{\gamma_R}(\gamma_G M_G - \gamma_U M_{P_U} + m M_{E_P}) \quad (27)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数,取1.0; γ_E 和 γ_{P_W} 的取值与式(25)相同; γ_R 通过可靠度分析确定。与抗滑稳定性一样,将 γ_R 取不同的值,缩放坞墙的横向断面尺寸使坞墙抗倾稳定性恰好满足式(27),同时计算缩放断面后的抗滑稳定性可靠指标,计算结果如表7所示。由表7可见,当 $\gamma_{P_W}=1.05$ 、 $\gamma_R=1.45$ 以及 $\gamma_{P_W}=1.20$ 、 $\gamma_R=1.30$ 时,坞墙抗倾稳定性的可靠指标近似达到确定的设计可靠指标3.80。

表7 γ_{P_W} 和 γ_R 取不同值时的抗倾稳定性的可靠指标平均值

Tab.7 Mean reliability indexes of overturning stability for different γ_{P_W} and γ_R

结构型式	$\gamma_{P_W}=1.05$		$\gamma_{P_W}=1.20$	
	$\gamma_R=1.40$	$\gamma_R=1.45$	$\gamma_R=1.25$	$\gamma_R=1.30$
有灌浆帷幕	3.574 821	3.854 441	3.388 343	3.706 028
无灌浆帷幕	3.782 555	4.089 181	3.718 483	4.071 663
平 均	3.678 688	3.971 811	3.553 413	3.888 846

4 结 语

本文对按《干船坞设计规范(水工结构)》(JTJ 252-87)设计的干船坞扶壁式坞墙的抗滑、抗倾稳定性进行了可靠度校准,并研究了分项系数设计方法,确定了抗力分项系数的取值。研究得出如下结论:

(1)扶壁式坞墙抗滑和抗倾稳定性的设计可靠指标可分别取3.1和3.8;

(2)综合分析计算结果,考虑到 γ_{P_W} 取1.05时的抗力分项取值较大,建议水压力分项系数 γ_{P_W} 取1.20。因此,对于抗滑稳定性,可采用式(25)表示的分项系数设计表达式进行稳定性设计,其中抗力分项系数可取 $\gamma_R=1.00$;对于抗倾稳定性,可采用式(27)表示的分项系数设计表达式进行稳定性设计,其中抗力分项系数可取 $\gamma_R=1.30$ 。

参 考 文 献:

- [1] 《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. (Drafting Group of Unified Standard of Reliability of Structural Design for Harbour Engineering. Reliability of port engineering structures[M]. Beijing: China Communications Press, 1992. (in Chinese))
- [2] 王浩芬,刘锡岭. 重力式码头抗倾、抗滑稳定的可靠度分析[J]. 水运工程,1992(2):52-58. (WANG Hao-fen, LIU Xi-ling. Reliability analysis of sliding and overturning stability of gravity quay[J]. Port and Waterway Engineering, 1992(2): 52-58. (in Chinese))
- [3] 《重力式码头设计与施工规范》修订编写组. 重力式码头抗滑、抗倾稳定性按可靠指标设计的方法[R]. 大连:大连理工大学,2006. (Revising Group of Design and Construction Code for Gravity Quay. Reliability design methods of sliding and overturning stability of gravity quay[R]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [4] 贡金鑫,麦远俭,王利欢. 重力式码头抗滑、抗倾稳定性可靠指标计算及程序实现[J]. 水利水运工程学报,2008(4):9-13. (GONG Jin-xin, MAI Yuan-jian, WANG Li-huan. Reliability analysis of sliding and overturning stability of gravity quay and computing program[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(4): 9-13. (in Chinese))

- [5] 王利欢,贡金鑫,李荣庆,等. 重力式码头稳定性可靠指标简化计算方法[J]. 水运工程, 2011(1): 143-149. (WANG Li-huan, GONG Jin-xin, LI Rong-qing, et al. Simplified method for analyzing the reliability of stability of gravity quay[J]. Port and Waterway Engineering, 2011(1): 143-149. (in Chinese))
- [6] 叶建科,吴曼涓,严晨宇,等. 重力式码头抗滑抗倾稳定表达式修订案例验证[J]. 水运工程, 2013(4): 69-71, 75. (YE Jian-ke, WU Man-juan, YAN Chen-yu, et al. Checking calculation of gravity wharf cases for revised stability formula to anti-sliding and anti-overturn[J]. Port and Waterway Engineering, 2013(4): 69-71, 75. (in Chinese))
- [7] 李荣庆,贡金鑫,杨丽民. 板桩结构可靠度分析[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1265-1271. (LI Rong-qing, GONG Jin-xin, YANG Li-ming. Reliability analysis of sheet-pile structures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 1265-1271. (in Chinese))
- [8] 李荣庆,贡金鑫,杨丽民. 板桩结构设计的目标可靠指标和抗力系数[J]. 水利水运工程学报, 2008(2): 71-77. (LI Rong-qing, GONG Jin-xin, YANG Li-ming. Target reliability index and resistance factor for design of sheet pile quays[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(2): 71-77. (in Chinese))
- [9] JTJ 252-1987, 干船坞设计规范(水工结构)[S]. (JTJ 252-1987, Code for design of dry dock(hydraulic structure)[S]. (in Chinese))
- [10] 陈万佳. 港口水工建筑物[M]. 北京:人民交通出版社, 1989. (CHEN Wan-jia. Hydraulic structures of port[M]. Beijing: China Communications Press, 1989. (in Chinese))
- [11] 贡金鑫. 干船坞坞墙可靠度分析与设计[R]. 大连:大连理工大学, 2013. (GONG Jin-xin. Reliability analysis and design of dry dock wall[R]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [12] JTS 167-2-2009, 重力式码头设计与施工规范[S]. (JTS 167-2-2009, Design and construction code for gravity quay[S]. (in Chinese))
- [13] 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: 138-152. (GONG Jin-xin. Reliability computational methods of engineering structures[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2003: 138-152. (in Chinese))

Reliability analysis and sub-coefficient method design for stability of counterforted quay wall

GAO Shu-fei¹, GONG Jin-xin¹, LIU Yong-xiu², ZHAO Xiao-lan², DU Jian-sheng²

(1. *The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*; 2. *CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China*)

Abstract: Reliability calibration hereby means the analysis of the structure reliability designed according to the specifications, which is an analysis of the safety level of structures specified by the specifications. Because the sub-coefficient design method adopts uncertainty of the variables in designing coefficients, the designed structure has better reliability consistency in comparison with adoption of a single safety factor method, and therefore it is more reasonable. Based on the revised *Code for Design of Dry Dock (Hydraulic Structures)* (JTJ 252-87), the reliability of stability for the counterforted quay wall is calibrated and the sub-coefficients are designed in this paper. As a result, the anti-sliding and anti-overturning stability reliability indexes designed have been presented for the counterforted quay wall, and the expression and the suggested values of sub-coefficient in verifying anti-sliding and anti-overturning stability for the counterforted quay wall have been given. The analysis results show that the anti-sliding and anti-overturning stability reliability indexes designed for the counterforted quay wall, in accordance with the *Code for Design of Dry Dock (Hydraulic Structures)* (JTJ 252-87), are expressed as 3.1 and 3.8 respectively. And based on this verification result and level of safety, the resistance factors in the sub-coefficients of the expression calculating the anti-sliding and anti-overturning stability of the counterforted quay wall would be taken as 1.00 and 1.30 respectively. The analysis and calculation results mentioned above can provide a reference for modifying the existing dry dock design specifications.

Key words: counterforted quay wall; anti-sliding stability; anti-overturning stability; reliability; sub-coefficients