



多级重力式码头最不利失效模式分析

钟利, 张鹏飞, 丁德斌, 李楠

(湖北省交通规划设计院, 湖北武汉 430051)

摘要: 通过将上一级码头的竖向地基应力和横向摩擦力视为一种超载, 并转化为土压力作用在下一级码头上, 运用可靠度方法, 结合纳溪沟码头工程实例分析多级重力式码头的最不利工况组合及最不利失效模式。结果表明: 多级重力式码头的各种作用组合中, 水位与多级重力式码头的上、下级码头墙身等高时的抗滑稳定性可靠度最低, 即为控制工况。

关键词: 多级重力式码头; 地基应力; 抗倾; 抗滑

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0049-006

On worst failure mode for multi-stage gravity quay

ZHONG Li, ZHANG Peng-fei, DING De-bing, LI Nan

(Communications Planning and Design Institute of Hubei Province, Wuhan 430051, China)

Abstract: The vertical foundation stress and horizontal friction of the higher level wharf is taken as an overload, which is converted into the earth pressure and acting on the lower level wharf. Based on the reliability theory and combining with the project example of Naxigou wharf, we analyze the most disadvantageous condition combination and the worst failure mode of the multi-stage gravity wharf. The results show that the anti-sliding stability has a minimum reliability when water-level is the same as the height of the junior and the greater wharf among various kinds of function combinations, which is the controlling condition.

Key words: multi-level gravity quay; foundation stress; anti-overturning; anti-sliding

在多级重力式码头设计中, 由于上级码头对下级码头稳定性会产生影响, 只有在确保上级码头稳定性的情况下才能进行下级码头的设计, 这是一种条件概率事件, 所以多级重力式码头的设计一般都采用分级设计, 分别对每一级码头进行设计。多级重力式码头如图1所示。当平台宽度 B 不大时, 上级码头在下一级码头墙后填土的破裂面之内, 上级码头对下级码头的稳定性将产生影响; 当平台宽度 B 足够大时, 上级码头在下一级码头墙后填土的破裂面之外, 上级码头对下级码头的稳定性将不会产生影响, 因此分2种基本的不同组合情况来说明多级重力式码头稳定性的计算模型。

三级以上的多级重力式码头设计同两级的方

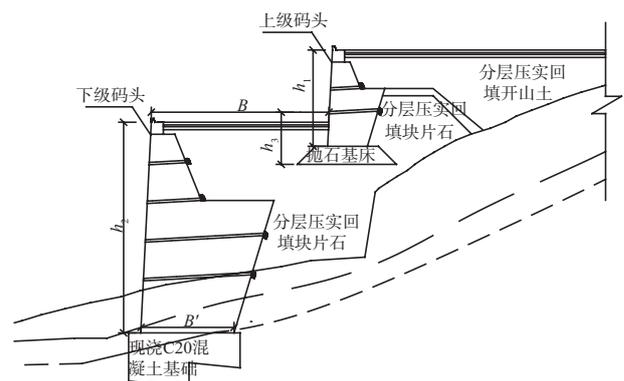


图1 多级重力式码头

法一样, 都是从最上面一级往下级进行设计, 第三级码头设计与第二级相同, 依此类推。这里仅以两级的码头为例, 且上一级码头稳定性验算方法同一般重力式码头相同。

收稿日期: 2012-11-08

作者简介: 钟利 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸工程结构及基础方面的研究、设计工作。

1 计算模型

1.1 上级码头在破裂面内时的计算模型

当平台宽度 $B \leq B' + h_2 \tan(45^\circ - \varphi/2)$ 时,即上级码头在下级码头墙后填土的破裂面之内时,上级码头对下级码头的稳定性将产生影响。此时要将上下级码头的稳定性分别进行验算。上级码头的验算和一般重力式码头一样,主要进行以下验算^[1-2]: 1) 抗倾覆稳定性验算; 2) 抗滑动稳定性验算; 3) 基床和地基承载力验算; 4) 码头墙身截面强度验算; 5) 整体稳定性验算。不同之处在于多级重力式码头的上级码头一般是建立在回填土上,而上级码头通过地基应力对下级码头产生影响,所以对上级码头地基承载能力的验算将会十分关键,只有当上级码头的地基应力验算通过后才能进行对下级码头的稳定性分析。

下级码头的稳定性验算内容和上级码头一样,虽然验算内容一样但是由于上级码头对下级码头产生了作用,所以与一般重力式码头的计算模型相比,下级码头的作用及作用组合差别较大,具体表现为:多级重力式码头上级码头对下级码头的作用是上级码头通过竖向地基应力和横向基底摩擦力作用在下一级码头上,对于下级码头而言这2种荷载属于超载。在验算下级码头抗倾、抗滑稳定性时,先按照一般计算码头稳定性的方法确保上级码头的稳定性,并计算出上级码头的地基应力和基底摩擦力,并将上级码头墙后填土等效为均布荷载,再绘出下级码头的具体受力计算图,计算下级码头的抗倾、抗滑稳定性。

上级码头的竖向地基应力为梯形荷载,但是在实际工程设计中为了简化计算一般把梯形荷载等效为均布荷载 q_1 。在计算下级码头稳定性时,上级码头通过等效均布荷载 q_1 、基底横向摩擦力 F_1 (即上级码头的滑动力)和墙后回填土自重等效均布荷载 q_2 作用于下级码头。上级码头的地基应力对下一级码头所增加的土压力如图2所示,上级码头的地基应力从基底面按填料内摩擦角 φ 和 $45^\circ + \varphi/2$ 的角度传递到下一级码头。为了简化计算,实际设计中一般不考虑过渡直线,而考虑为一种安全储备。本实例中上级码头对下级码头的

作用恰好在下级码头的下墙范围内,且由于上级码头距下级码头较远,导致其墙后回填土作用力并未作用在下级码头上(实际计算以受力计算图的传递范围为准)^[3-4]。

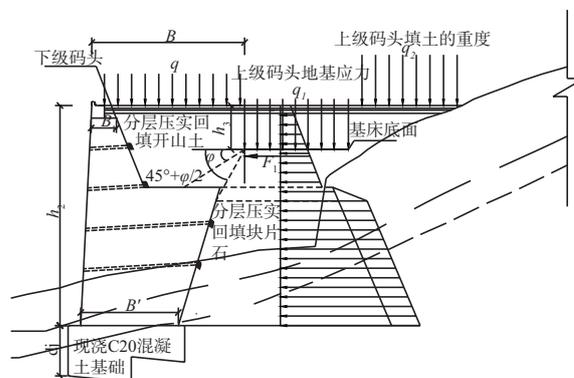


图2 多级重力码头受力1

从图2可知,影响上级码头对下级码头作用的因素有: 1) 上级码头的平均地基应力 q_1 , q_1 越大产生的土压力对下级码头的影响越大; 2) 上级码头的基础埋置深度 h_3 , h_3 越小地基应力作用在码头墙身上的影响范围越大; 3) 应力扩散角 φ , φ 越大地基应力作用在墙身的影响范围越小; 4) 上级码头与下级码头的距离 B 越小地基应力作用在码头墙身的范围越大,如果两级码头的距离足够远上级码头就不会影响到下级码头的稳定性; 5) 基底横向摩擦力 F_1 越大对下级码头越不利。

1.2 上级码头在破裂面外时的计算模型

当平台宽度 $B \geq B' + h_2 \tan(45^\circ - \varphi/2)$ 时,上级码头在下级码头墙后回填土的破裂面之外,上级码头的地基应力不会传递到下级码头墙身上,即上级码头对下级码头的稳定性将不会产生影响,如图3所示。对多级重力式码头的稳定性进行分级验算时,上、下级码头和一般重力式码头的验算相同。下级码头所承受的荷载是回填土压力和码头面荷载,就不考虑来自上级码头的竖向地基应力 q_1 、横向基底摩擦力 F_1 和上级码头墙后填土等效而来的均布荷载 q_2 的作用。总之当 $B \geq B' + h_2 \tan(45^\circ - \varphi/2)$ 即上级码头在下级码头墙后回填土的破裂面之外时,上级码头和下级码头在稳定性验算是相互独立的,不构成第一种情况中的条件事件。

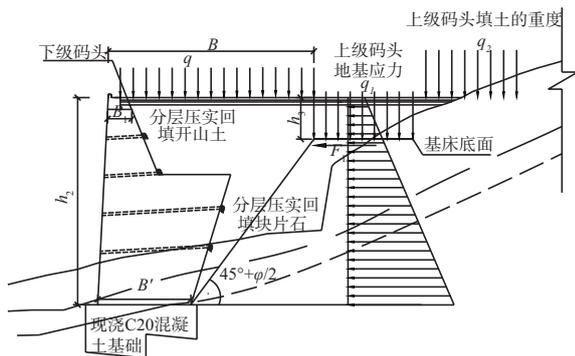


图3 多级重力式码头受力2

两级以上的多级码头与两级的多级重力式码头的确定方法一样，第三级以上码头稳定性计算方法和第二级码头相同，以此计算多级的重力式码头稳定性，本文仅以两级的重力式码头为例。

2 作用组合

多级重力式码头进行分级设计时，须保证每一级码头的稳定性，且首先从最上面一级码头开始设计，在满足上级码头稳定的前提下再继续下级码头的设计。两级以上的多级码头与两级重力式码头的确定方法相同，所以在此仅以两级的重力式码头为例说明作用组合。

2.1 第一级码头作用组合

1) 设计高水位时：结构自重（永久作用）+ 填土土压力（永久作用）+ 码头面等效均布荷载产生的土压力（可变作用）+ 系缆力（可变作用）…（填土采用浮重度）；

2) 设计低水位时：结构自重（永久作用）+ 填土土压力（永久作用）+ 码头面等效均布荷载产生的土压力（可变作用）+ 系缆力（可变作用）…（填土采用天然重度）。

2.2 第二级码头作用组合

1) 设计高水位时：结构自重（永久作用）+ 填土土压力（永久作用）+ 码头面等效均布荷载产生的土压力（可变作用）+ 第一级码头地基应力（可变作用）+ 第一级码头基底摩擦力（可变作用）+ 系缆力（可变作用）…（填土采用浮重度）；

2) 设计低水位时：结构自重（永久作用）+ 填土土压力（永久作用）+ 第一级码头地基应力（可变作用）+ 第一级码头基底摩擦力（可变作

用）+ 码头面等效均布荷载产生的土压力（可变作用）+ 系缆力（可变作用）…（填土采用天然重度）。

不同水位时，虽然作用的种类一致，但是在不同水位时作用的大小不同，且水位对于码头是种非常重要的工况，所以分为设计高水位和设计低水位的作用组合。

3 多级重力式码头稳定性可靠度计算的极限状态方程

对于多级重力式码头的抗倾覆、抗滑动、地基承载力只有抗力大于等于其效应才能满足稳定性的要求，整个码头的安全才确定处于可靠状态，所以由此可以得出多级重力式码头稳定性的极限状态方程为^[5-6]：

$$\begin{cases} Z_1 = g_1(M_R - M_S) = M_R - M_S = 0 \\ Z_2 = g_2(F_R - F_S) = F_R - F_S = 0 \\ Z_3 = g_3(P_u - S) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： M_S 和 M_R 为倾覆力矩和抗倾覆力矩； F_S 和 F_R 为滑动力和抗滑力； P_u 和 S 为地基的最大允许承载能力和作用于基础的最大的地基应力。

变量的统计参数和概率分布宜根据具体的工程统计确定。这里根据地勘资料和相应规范给出的建议值，各随机变量的统计参数的选取见表1。

表1 各随机变量的统计参数

码头	变量	分布类型	平均值/m	标准差σ	变异系数ν	变量代号
	μ	正态	0.55	0.055	0.10	$x(1)$
	q	极值 I 型	0.78	0.110	0.14	$x(2)$
上 级	ρ_1	正态	19.2	0.620	0.03	$x(3)$
	φ_1	正态	33.3	1.800	0.05	$x(4)$
	δ_1	正态	10.0	2.000	0.20	$x(5)$
	ρ_2	正态	19.2	0.620	0.03	$x(6)$
下 级	φ_2	正态	33.3	1.800	0.05	$x(7)$
	δ_2	正态	10.0	2.000	0.20	$x(8)$

注： μ 为基底摩擦系数； q 为码头面的汽车等效均布荷载； ρ_1 、 ρ_2 为上下级码头的填土密度； φ_1 、 φ_2 为上下级码头的填土内摩擦角； δ_1 、 δ_2 为上下级码头的墙背摩擦角。

4 多级重力式码头失效模式分析

通过纳溪沟码头工程的典型断面，首先经已选取的随机变量建立功能函数，然后将随机变量的具体数值和分布类型代到多级重力式码头稳定性的抗倾、抗滑、地基承载力极限状态方程中，

利用所编写的JC法matlab程序，计算出多级重力式码头的抗倾、抗滑、地基承载力的可靠指标 β ，最后根据已求得的抗倾、抗滑可靠指标 β 计算出系统可靠度。

4.1 多级重力式码头的典型断面1

上级码头墙身尺寸见图4，上墙墙背倾角为 21° ，下墙墙背倾角为 -13° ，基础埋深为2 m，基底底宽为7.8 m，填土面水平，墙后填土的物理

力学指标 $\rho_1=1.8 \text{ t/m}^3$ ，墙后填土的内摩擦角 $\phi_1=32^\circ$ （为等效摩擦角不考虑粘聚力），墙背摩擦角 $\delta_1=10^\circ$ ，基底摩擦系数 $\mu=0.5$ ，码头面等效汽车均布荷载 $q=10 \text{ kPa}$ ，墙身密度 $\rho=2.3 \text{ t/m}^3$ 。

下级码头墙后填土的内摩擦角 $\phi_1=35^\circ$ ，其余如下级码头的上墙墙背倾角、下墙墙背倾角等都与上墙相同。断面1的上、下级码头高、中水位可靠指标分别见表2。

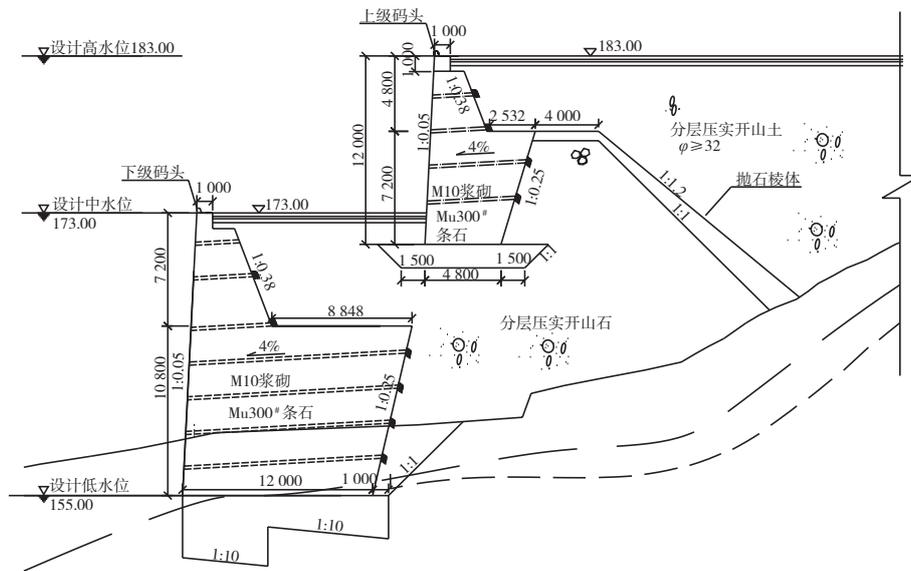


图4 多级重力式码头典型断面1

表2 断面1的上、下级码头高、中水位可靠指标

β	上级码头12 m				下级码头18 m			
	设计高水位	失效概率	设计中水位	失效概率	设计中水位	失效概率	设计低水位	失效概率
抗滑	3.698 1	$1.086 1 \times 10^{-4}$	4.217 7	$1.234 0 \times 10^{-5}$	3.820 9	$6.648 3 \times 10^{-5}$	5.947 8	$1.358 9 \times 10^{-9}$
抗倾覆	4.696 0	$1.326 5 \times 10^{-6}$	8.614 2	0	5.689 6	$6.366 9 \times 10^{-9}$	8.548 7	0
地基承载力	5.799 3	$3.872 5 \times 10^{-9}$	6.973 4	$1.500 4 \times 10^{-5}$				
系统可靠度	3.695 7	$1.096 2 \times 10^{-4}$	4.215 7	$1.234 0 \times 10^{-5}$	3.820 9	$6.648 8 \times 10^{-5}$	5.947 8	$1.358 9 \times 10^{-9}$

对于多级重力式码头的上级码头，设计高水位时的抗倾、抗滑、系统可靠度指标分别比设计中水位时（相当于单级时的设计低水位）的小；对于下级码头，设计中位（相当于单级时的设计高水位）的抗倾、抗滑、系统可靠度指标则分别比设计低水位时的小。因此，设计高水位为上级码头的最不利工况，设计中水位（相当于单级时的设计高水位）为下级码头的最不利工况，即分级考虑多级重力式码头时，若将上、下级码头看做单级码头，其最不利水位为与各自码头墙身等

高时的水位，即设计高水位对整个码头的抗倾、抗滑最不利。

抗倾、抗滑设计中，抗倾可靠指标比抗滑可靠指标大得多。按照重力式码头设计与施工规范的要求：二级重力式码头抗滑可靠度指标不小于3.5，抗倾指标不小于4。由表2可知，上、下级码头在断面1处分别对应于各水位的抗倾可靠指标为4.696 0、8.614 2、5.689 6、8.548 7，比规定值分别大0.696 0、4.614 2、1.689 6、4.548 7，抗滑可靠指标分别是3.698 1、4.217 7、3.820 9、5.947 8，

比规定值分别大0.198 1、0.717 7、0.320 9、2.447 8。由此可见,各水位下抗滑可靠指标较抗倾指标更接近设计值,即对于结构断面为衡重式的重力式码头,当抗滑满足要求时抗倾也能满足

要求。

4.2 多级重力式码头的典型断面2

断面参数如图5所示,其余墙身参数、填土指标和荷载与断面1相同。

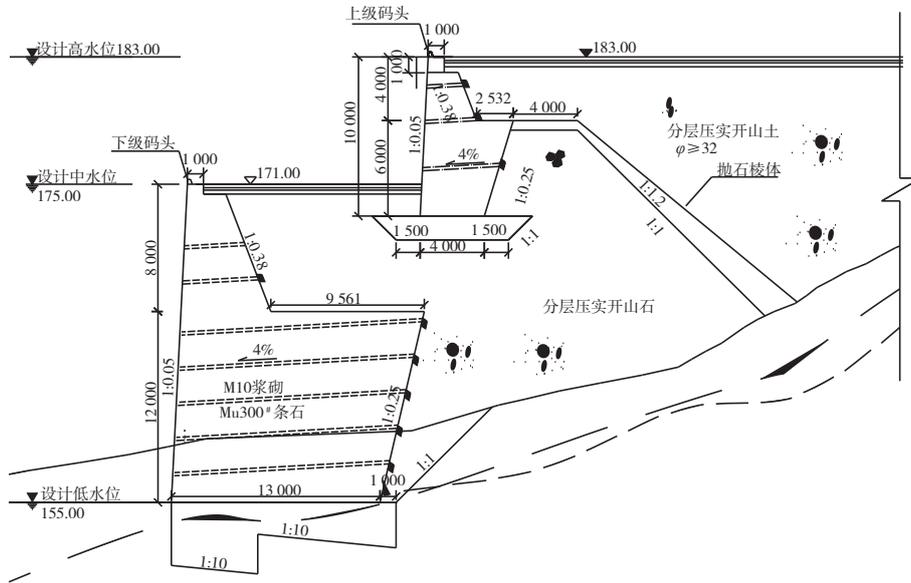


图5 多级重力式码头典型断面2

对断面2的可靠指标分析同样可以得出与断面1中第2条相似的结论:分级考虑多级重力式码头时,若将上、下级码头看作单级码头,其最不利水位为与各自码头墙身等高时的水位。

由表3中的可靠指标同样可知:在抗倾、抗滑设计中,抗倾可靠指标比抗滑可靠指标大得多。上、下级码头在断面2处分别对应于各水位的抗倾

可靠指标为5.185 8、8.852 7、5.871 3、7.428 3,比规定值分别大1.185 8、4.852 7、1.871 3、3.428 3,抗滑可靠指标分别是3.861 9、4.867 8、3.791 3、4.678 1,比规定值分别大0.361 9、1.367 8、0.291 3、1.178 1。同样,由断面2的可靠指标分析可以得出:各水位下抗滑可靠指标较抗倾指标更接近设计值,当抗滑满足要求时抗倾也能满足要求。

表3 断面2的上、下级码头高、中水位可靠指标

β	上级码头10 m				下级码头20 m			
	设计高水位	失效概率	设计中水位	失效概率	设计中水位	失效概率	设计低水位	失效概率
抗滑	3.861 9	$5.625 4 \times 10^{-5}$	4.867 8	$5.813 2 \times 10^{-7}$	3.791 3	$7.493 0 \times 10^{-5}$	4.678 1	$1.447 7 \times 10^{-6}$
抗倾覆	5.185 8	$1.075 4 \times 10^{-7}$	8.852 7	0	5.871 3	$2.162 0 \times 10^{-9}$	7.428 3	$5.495 6 \times 10^{-14}$
地基承载力	6.122 1	$4.617 5 \times 10^{-10}$	4.200 4	$1.332 2 \times 10^{-5}$				
系统可靠度	3.861 5	$5.636 2 \times 10^{-5}$	4.867 3	$5.813 2 \times 10^{-7}$	3.791 3	$7.493 2 \times 10^{-5}$	4.678 1	$1.447 7 \times 10^{-6}$

4.3 多级重力式码头的典型断面3

断面参数如图6所示,其余墙身参数、填土指标和荷载与断面1相同。

断面3的上、下级码头高、中水位可靠指标分别见表4。由表4中的可靠指标分析可以得出与前2个断面相同的结论,即其最不利水位为与各自码头墙身等高时的水位。

在抗倾、抗滑设计中,抗倾可靠指标比抗滑可靠指标大得多,结果与断面1、2相同。具体由表4可知,上、下级码头在断面3处分别对应于各水位的抗倾可靠指标为4.713 2、7.837 1、5.587 1、8.377 1,分别比规定值大0.713 2、3.837 1、1.587 1、4.377 1,抗滑可靠指标分别是3.732 9、4.798 1、3.898 2、5.276 5,分别比规定值大0.232 9、1.298

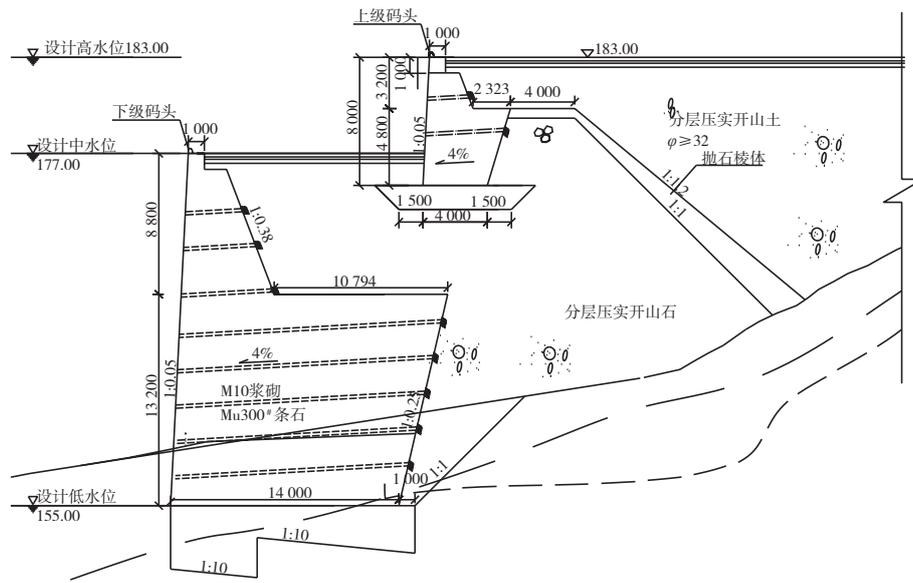


图6 多级重力式码头典型断面3

表4 断面3的上、下级码头高、中水位可靠指标

β	上级码头8 m				上级码头22 m			
	设计高水位	失效概率	设计中水位	失效概率	设计中水位	失效概率	设计低水位	失效概率
抗滑	3.732 9	$9.4\ 64\ 4 \times 10^{-5}$	4.798 1	$8.008\ 9 \times 10^{-7}$	3.898 2	$4.845\ 5 \times 10^{-5}$	5.276 5	$6.583\ 7 \times 10^{-8}$
抗倾覆	4.713 2	$1.219\ 3 \times 10^{-6}$	7.837 1	$2.331\ 5 \times 10^{-15}$	5.587 1	$1.154\ 5 \times 10^{-8}$	8.377 1	0
地基承载力	6.6 535	$1.431\ 0 \times 10^{-11}$	4.422 9	$4.869\ 2 \times 10^{-6}$				
系统可靠度	3.730 3	$9.586\ 3 \times 10^{-5}$	4.798 1	$8.008\ 9 \times 10^{-7}$	3.898 1	$4.846\ 7 \times 10^{-5}$	5.276 5	$6.583\ 7 \times 10^{-8}$

1、0.398 2、1.776 5。因此，同样得出各水位下抗滑可靠指标较抗倾指标更接近设计值，即当抗滑满足要求时抗倾也能满足要求。

对于多级重力式码头的抗倾、抗滑设计，不存在某一特定水位使得上、下级码头都同时处于最危险状态，即在同一水位时上级码头和下级码头的稳定性都是最不利。设计多级重力式码头时，须对每一级码头进行单独设计，即针对上、下级码头各自最不利水位进行抗倾、抗滑设计。上级码头最不利水位是对应于上级码头的高水位，即设计断面中的设计高水位；下级码头的最不利水位是对应于下级码头面的高水位，即设计断面中的设计中水位。分级考虑多级重力式码头时，若将上、下级码头看做单级码头，其最不利水位为与各自码头墙身等高时的水位，即设计高水位对整个码头的抗倾、抗滑最不利。

分析还表明，在多级重力式码头的抗倾、抗滑稳定性验算中，其抗滑稳定性验算更为关键。

5 结语

各种作用组合中，水位与多级重力式码头的上、下级码头墙身等高时的抗滑稳定性可靠度最低，即为控制工况。

参考文献：

- [1] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].
- [2] 王利欢. 重力式码头抗滑、抗倾稳定性可靠度分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [3] 高大钊. 土力学与土质学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [4] 卢廷浩. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2005.
- [5] 贡金鑫, 麦远俭. 重力式码头抗滑、抗倾稳定性按可靠指标计算及程序实现[J]. 水利水运工程学报, 2008(4): 8-1.
- [6] 杜永峰, 余钰. 重力式挡土墙稳定性的结构体系可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 349-353.