



基于分项系数法的板桩式坞墙稳定性设计*

冯云芬¹, 高树飞¹, 贡金鑫²

(1. 聊城大学 建筑工程学院, 山东 聊城 252000;

2. 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)

摘要: 目前现行的 JTS 190—2018《船厂水工工程设计规范》规定板桩式坞墙稳定性按照 JTS 167—2018《码头结构设计规范》中有关板桩码头的相关条文进行验算, 但板桩码头的水压力比坞墙小, 直接采用板桩码头“踢脚”稳定性验算的分项系数表达式和分项系数取值是否合理有待研究。通过校准按旧规范 JTJ 252—1987《干船坞设计规范(水工结构)》设计的板桩式坞墙稳定性的可靠度, 得出板桩式坞墙“踢脚”稳定性的目标可靠指标, 并确定按现行规范设计时的坞墙稳定性可靠指标。结果表明, 板桩式坞墙“踢脚”稳定性的目标可靠指标应取 4.0, 而按现行规范设计时的可靠指标均值略大于 4.0, 故现行规范中分项系数的取值是合理的。

关键词: 板桩式坞墙; 稳定性; 可靠指标; 分项系数

中图分类号: U 656.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0191-06

Design for stability of sheet piled dock wall based on partial factor method

FENG Yun-fen¹, GAO Shu-fei¹, GONG Jin-xin²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China;

2. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In the JTS 190-2018 *Design Code for Maritime Structures and Services in Shipyard*, the stability of sheet piled dock wall should be checked in accordance with the relevant provisions of sheet piled wharf in JTS 167-2018 *Design Code for Wharf Structures*. However, the water pressure for piled wharf is smaller than that of the dock wall. Thus, the rationality of directly using partial factor format and factor values for the stability of sheet piled wharf should be verified. Through the calibration of reliability for the stability of sheet piled dock wall, which is designed by the old code JTJ 252-1987 *Code for Design of Dry Dock (Hydraulic Structures)*, the target reliability index is determined, and reliability indexes for wall designed by current practice are determined. The results show that the target reliability index of stability for sheet piled dock wall should be 4.0, while the average value of reliability index for wall designed by the new code is slightly larger than 4.0, which validates the rationality of factor values utilized in the current code.

Keywords: sheet piled dock wall; stability; reliability index; partial factor

坞墙是干船坞的重要组成部分之一, 其常用的结构形式有重力式、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, 还须具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

收稿日期: 2020-06-09

*基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2018BEE046); 聊城大学博士科研启动基金项目(318051702、318051533)

作者简介: 冯云芬(1982—), 女, 博士, 讲师, 从事结构可靠性和易损性研究。

了一定的研究^[1-7]，并在研究成果的基础上采用了分项系数设计方法，取代了原来的单一安全系数法，并最终囊括在最新的 JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[8]中。除了码头结构，最新的 JTS 190—2018《船厂水工工程设计规范》^[9]对坞墙的稳定性验算也全面采用了分项系数设计方法，而之前的 JTJ 252—1987《干船坞设计规范（水工结构）》^[10]采用的是单一安全系数法。对于坞墙的稳定性，高树飞等^[11]通过校准按旧规范设计的扶壁式坞墙稳定性确定了目标可靠指标，由此确立了相应的分项系数表达式和分项系数取值，与《船厂水工工程设计规范》的表达式和系数取值基本一致。但是，对于板桩式坞墙的“踢脚”稳定性并未见相似研究，而现行规范则是直接规定坞墙稳定性验算按《码头结构设计规范》中有关板桩码头的规定执行。然而，板桩码头与板桩式坞墙存在差异，坞墙前后的水压力较大，故相应的水压力分项系数和抗力分项系数取值是否适合坞墙有待研究。同时考虑到有关船坞结构可靠度的研究较少，故本文通过确立板桩式坞墙可靠指标的计算方法，再对按旧规范设计的板桩式坞墙的“踢脚”稳定性进行可靠度校准，确定相应的目标可靠指标，之后再确定按现行规范设计的稳定性的可靠指标，由此通过对比可靠指标的大小验证现行规范中分项系数表达式的合理性。

1 板桩式坞墙可靠度分析

1.1 极限状态方程及各变量的计算

板桩式坞墙“踢脚”稳定性的极限状态方程为：

$$M_{E_p} K_{p_1} - [(M_{E_a} + M_{E_{aq}}) K_{p_2} + M_{p_w}] = 0 \quad (1)$$

式中： M_{E_p} 为墙前被动土压力对拉杆锚碇点的稳定力矩； M_{E_a} 为墙后土体产生的主动土压力对锚碇点的力矩； $M_{E_{aq}}$ 为地面均载引起的主动土压力对锚碇点的力矩； M_{p_w} 为水压力对锚碇点的力矩； K_{p_1} 和 K_{p_2} 分别为被动土压力和主动土压力计算模式的不确定系数。

1.1.1 土压力及产生的力矩计算

根据文献[12]，进行土压力计算时，采用图1所示的计算简图。

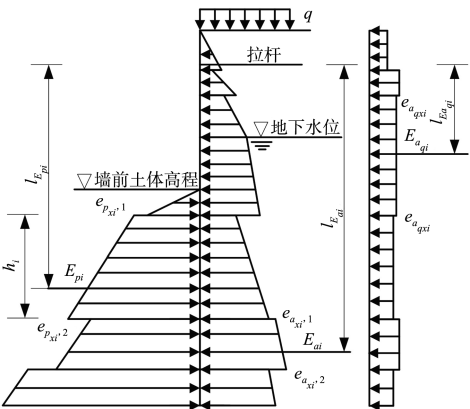


图1 土压力计算简图

墙前被动土压力对拉杆锚碇点的力矩为：

$$M_{E_p} = \sum_{i=1}^{n_1} 0.5(e_{p_{xi,1}} + e_{p_{xi,2}}) h_i l_{E_{pi}} \quad (2)$$

式中： n_1 为墙前土层数； h_i 为第*i*层土厚； $l_{E_{pi}}$ 为第*i*层土的被动土压力合力 E_{pi} 至拉杆作用点的距离； $e_{p_{xi,1}}$ 和 $e_{p_{xi,2}}$ 分别为墙前第*i*层土顶面和底面处被动土压力水平强度，按下列公式计算：

$$e_{p_{xi,1}} = \left(\sum_{j=1}^{i-1} \rho_j g h_j \right) K_{pi} \cos \delta_i + 2c_i \frac{\cos \varphi_i \cos \delta_i}{1 - \sin(\varphi_i + \delta_i)} \quad (3)$$

$$e_{p_{xi,2}} = \left(\sum_{j=1}^i \rho_j g h_j \right) K_{pi} \cos \delta_i + 2c_i \frac{\cos \varphi_i \cos \delta_i}{1 - \sin(\varphi_i + \delta_i)} \quad (4)$$

式中： δ_i 为第*i*层土与墙面的外摩擦角，根据文献[8]的规定取值； φ_i 为第*i*层土的内摩擦角； c_i 为第*i*层土的黏聚力； ρ_j 为第*j*层土的密度； h_j 为第*j*层土厚； K_{p_i} 为第*i*层土的被动土压力系数，按下式计算：

$$K_{p_i} = \frac{\cos^2 \varphi_i}{\cos \delta_i \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi_i + \delta_i) \sin \varphi_i}{\cos \delta_i}} \right]^2} \quad (5)$$

墙后主动土压力对拉杆锚碇点的力矩为：

$$M_{E_a} = \sum_{i=1}^{n_2} 0.5(e_{a_{xi,1}} + e_{a_{xi,2}}) h_i l_{E_{ai}} \quad (6)$$

式中： n_2 为墙后土层数； $l_{E_{ai}}$ 为第*i*层土的主动土压力合力 E_{ai} 至拉杆作用点的距离； $e_{a_{xi,1}}$ 和 $e_{a_{xi,2}}$ 分别为墙后第*i*层土顶面和底面处主动土压力水平强

度, 按下列公式计算:

$$e_{a_{xi},1} = \left(\sum_{j=1}^{i-1} \rho_j g h_j \right) K_{ai} \cos \delta_i - 2c_i \cdot \frac{\cos \varphi_i \cos \delta_i}{1 + \sin(\varphi_i + \delta_i)} \quad (7)$$

$$e_{a_{xi},2} = \left(\sum_{j=1}^i \rho_j g h_j \right) K_{ai} \cos \delta_i - 2c_i \cdot \frac{\cos \varphi_i \cos \delta_i}{1 + \sin(\varphi_i + \delta_i)} \quad (8)$$

式中: K_{ai} 为第 i 层土的主动土压力系数, 按下式计算:

$$K_{ai} = \frac{\cos^2 \varphi_i}{\cos \delta_i \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi_i + \delta_i) \sin \varphi_i}{\cos \delta_i}} \right]^2} \quad (9)$$

荷载土压力对拉杆锚碇点的力矩为:

$$M_{e_{aq}} = \sum_{i=1}^{n_2} e_{a_{qxi}} h_i l_{E_{aqi}} \quad (10)$$

式中: $l_{E_{aqi}}$ 为第 i 层荷载土压力合力 E_{aqi} 至拉杆锚碇点的距离; $e_{a_{qxi}}$ 为地面均布荷载产生的主动土压力水平强度, 按下式计算:

$$e_{a_{qxi}} = q K_{ai} \cos \delta_i \quad (11)$$

土压力及产生的力矩是以地面均匀荷载 q 、土的密度 ρ 、土内摩擦角 φ 和黏聚力 c 的函数形式表示的, 是因为进行可靠度分析时, q 、 ρ 、 φ 和 c 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。

1.1.2 水压力及产生的力矩

根据文献[9], 进行作用于坞墙的水压力计算时, 采用图 2 所示的计算简图, 作用在板桩墙的水压力按下式计算:

$$P_x = \rho g h_1 + \rho g h_2 \quad (12)$$

式中: P_x 为计算点的水压力强度; ρ 为水的密度; h_1 为计算点至墙前水位的高差, 计算点在墙前水位以下时取正值, 以上取负值; h_2 为计算点的渗透水头, 按下式计算:

$$h_2 = \frac{H_c}{L} x \quad (13)$$

式中: H_c 为墙前后水位差; L 为换算渗径总长度; x 为计算点至渗径终点的换算渗径长度。

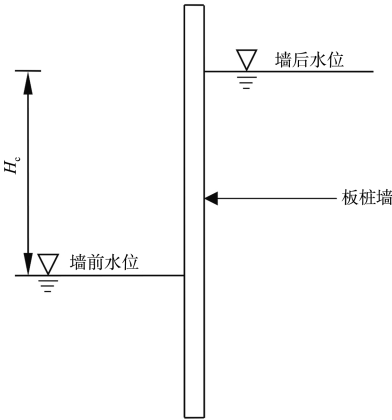


图 2 水压力计算简图

1.2 变量的概率分布和统计参数

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:

$$\begin{cases} \mu_X = k_X X_k \\ \delta_X = \sigma_X / \mu_X \end{cases} \quad (14)$$

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。

在板桩式坞墙“踢脚”稳定性可靠度分析中, 需要确定相关变量的统计参数, 由于尚无规范对于船坞结构设计中变量的统计参数进行统一规定, 故本文参照相关规范和论文确定变量的统计参数。根据文献[8]附录 R, 均布荷载 q 、中砂密度、主动土压力和被动土压力计算模式不确定系数的统计参数见表 1。由文献 [6] 可知, 土性参数的随机性非常大, 这一方面是由土的基本特性决定的, 另外还与对土类别判别的准确与否有关, 故本文对于其他种类土的密度统计参数参照中砂取值, 变异系数取 0.03, 均值系数取 1.07, 均服从正态分布。根据文献[6], 土黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的平均值均取标准值, 黏聚力的变异系数统一取 0.25, 内摩擦角的变异系数统一取 0.2, 均服从正态分布。从而, q 、 ρ 、 φ 和 c 的平均值与标准差可由式(14)计算。

表 1 部分作用和抗力的概率分布和统计参数

变量	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	20.0 kPa	0.78	0.14	15.6	2.20	极值Ⅰ型
中砂水上密度 ρ_s	1.80 t/m ³	1.07	0.03	19.2	0.62	正态
中砂水下密度 ρ'_s	0.95 t/m ³	1.01	0.03	9.6	0.30	正态
被动土压力计算模式不确定性系数 K_{p_i}	1.0	1.00	0.02	1.0	0.02	正态
主动土压力计算模式不确定性系数 K_{p_s}	1.0	1.00	0.02	1.0	0.02	正态

2 “踢脚”稳定性可靠度校准和分项系数设计

2.1 可靠度校准

根据旧规范 JTJ 252—1987《干船坞设计规范（水工结构）》，板桩入土深度必须满足以下条件：

$$M_{E_{pk}} > KM_{E_k} \tag{15}$$

式中： K 为稳定安全系数； M_{E_k} 为墙后主动土压力标准值、水压力标准值等对锚碇点的力矩； $M_{E_{pk}}$ 为墙前被动土压力标准值对锚碇点的力矩。以下通过一个工程实例计算按单一安全系数法设计的

板桩式坞墙“踢脚”稳定性的可靠指标。

某一块桩式坞墙结构的断面如图 3 所示，坞室底高程为-9.2 m，结构安全等级为二级。以该工程断面为基础，改变坞室底高程和墙后地下水位，得到多个不同的设计工况，之后计算不同工况下坞墙的可靠指标。坞室底高程分别按-7.7、-8.2、-8.7和-9.2 m 考虑，墙后地下水位分别按-0.6、-3.0、-4.0 和-5.0 m 考虑。地面均布荷载 $q=20$ kPa。土层分布及物理力学指标见表 2。

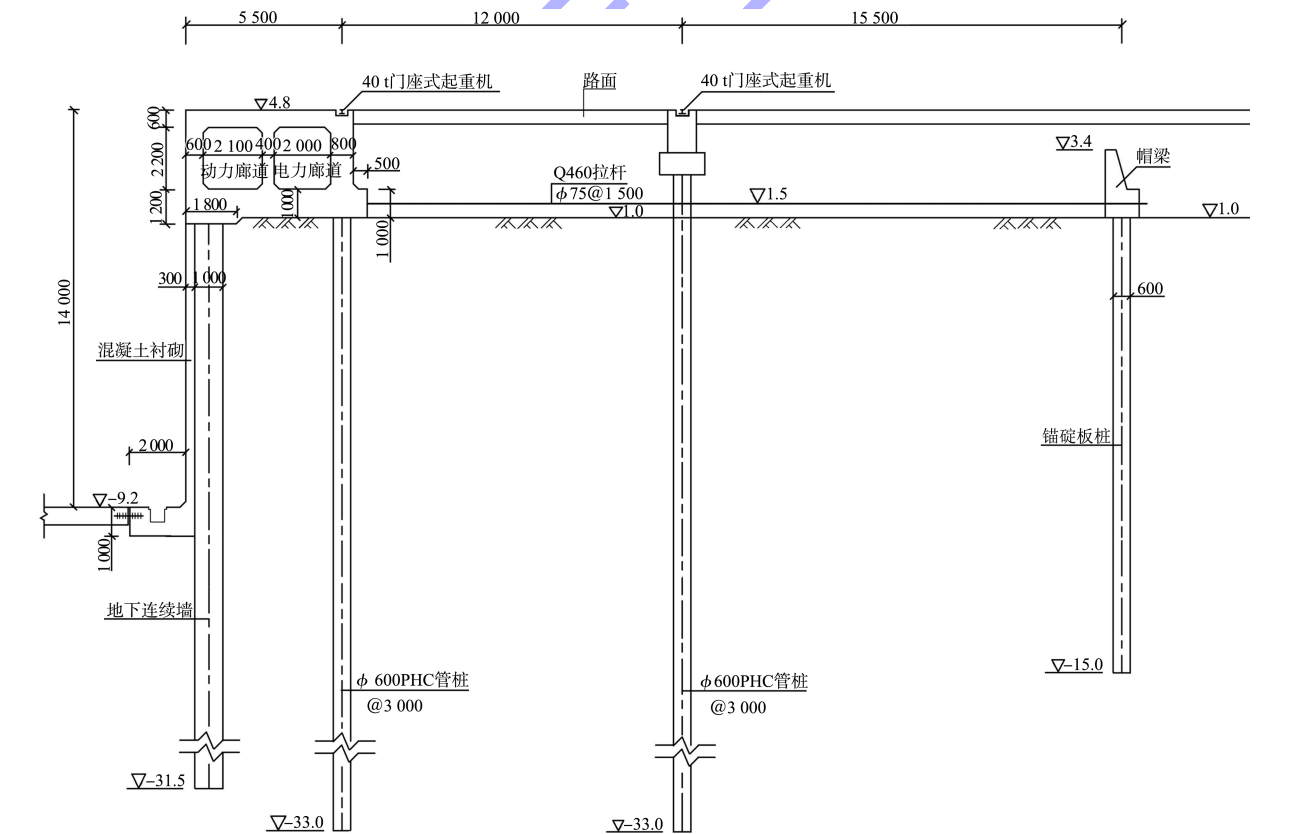


图 3 板桩式坞墙断面（尺寸：mm；高程：m）

表 2 土层分布及物理力学指标

土层名称	层顶 高程/m	层底 高程/m	含水量 w/%	密度 $\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 e	浮密度 $\rho'/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{ }^{\circ})$	黏聚力 c/kPa
回填中砂	4.8	1.0	—	1.80	—	—	32.0	0
冲填土	1.0	-0.5	20.8	1.87	0.731	0.97	9.8	25.0
粉质黏土夹粉土	-0.5	-13.0	27.4	1.90	0.814	0.94	11.5	28.1
粉土、粉质夹黏土	-13.0	-23.0	25.2	1.95	0.749	0.99	12.8	27.1
粉质黏土	-23.0	-28.0	24.8	1.99	0.694	1.00	9.8	26.8
粉土	-28.0	-40.0	23.1	1.99	0.672	1.02	13.8	30.1

由式(15)计算得不同断面在不同地下水位下的安全系数 K , 结果见表 3 第 3 列。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、不同坞室底高程时的“踢脚”稳定性可靠指标, 见表 3 第 4 列。改变板桩墙入土深度, 至恰好满足稳定要求($K=1.63$), 表 3 给出了刚好满足稳定

性要求时的板桩入土深度和相应的可靠指标。 $K=1.63$ 是参照 JTJ 252—1987《干船坞设计规范(水工结构)》(规定 K 的范围为 1.3~1.5)和现行码头结构设计规范的安全水平确定的。

表 3 中调整板桩入土深度后的可靠指标平均值为 4.010 5, 由此确定板桩式坞墙“踢脚”稳定性的目标可靠指标为 4.00。

表 3 板桩式坞墙“踢脚”稳定性的安全系数和可靠指标

坞室底高程/m	地下水位/m	调整板桩入土深度前		调整板桩入土深度后		板桩底高程/m
		安全系数 K	可靠指标 β	安全系数 K	可靠指标 β	
-7.7	-0.6	1.661 3	4.714 980	1.630 2	4.617 973	-31.02
	-3.0	1.614 8	4.134 830	1.629 8	4.178 723	-31.74
	-4.0	1.597 9	3.904 413	1.630 1	3.997 283	-32.02
	-5.0	1.582 3	3.681 201	1.630 1	3.818 644	-32.28
-8.2	-0.6	1.597 8	4.493 469	1.629 7	4.573 490	-32.01
	-3.0	1.553 1	3.915 114	1.629 7	4.103 581	-32.76
	-4.0	1.536 9	3.685 491	1.630 0	3.916 895	-33.05
	-5.0	1.522 0	3.463 091	1.630 0	3.736 596	-33.32
-8.7	-0.6	1.536 2	4.269 086	1.629 6	4.460 900	-33.04
	-3.0	1.493 3	3.692 527	1.629 9	3.986 742	-33.82
	-4.0	1.477 7	3.463 699	1.629 7	3.802 473	-34.11
	-5.0	1.463 4	3.242 113	1.629 7	3.627 080	-34.39
-9.2	-0.6	1.476 4	4.041 880	1.629 8	4.311 829	-34.11
	-3.0	1.435 2	3.467 113	1.629 9	3.851 598	-34.91
	-4.0	1.420 2	3.239 079	1.629 6	3.675 618	-35.21
	-5.0	1.406 5	3.018 308	1.629 7	3.508 934	-35.50
平均值					4.010 522	

2.2 分项系数法设计

参考现行《船厂水工工程设计规范》中坞墙稳定性验算的规定和《码头结构设计规范》中“踢脚”稳定性验算的表达式, 板桩式坞墙入土深度的分项系数设计表达式为:

$$\gamma_0(\gamma_E M_{E_{ak}} + \gamma_w M_{w_k} + \gamma_E M_{E_{aqk}}) \leq \frac{1}{\gamma_R} M_{E_{pk}} \quad (16)$$

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, 取 1.35; γ_w 为水压力分项系数, 按《船厂水工工程设计规范》的规定, 该系数取 1.20, 而在《码头结构设计规范》中则取 1.05, 为说明两种取值的影响, 本文在计算中均予以考虑; γ_R 为抗力分项系数, 《码头结构设计规范》中取 1.25; M_{w_k} 为水压力对锚碇点的力矩标准值; 其他

M 为相应力矩标准值。

对 γ_w 和 γ_R 取不同的值, 改变坞墙入土深度使“踢脚”稳定性恰好满足式(16)的要求, 同时计算上述不同工况(不同坞室底高程和地下水位)下坞墙入土深度调整后的可靠指标, 并计算不同工况可靠指标的均值。经过计算, 当 $\gamma_w = 1.05$ 、 $\gamma_R = 1.25$ 时, 不同工况可靠指标的均值为 4.024 942; 当 $\gamma_w = 1.20$ 、 $\gamma_R = 1.20$ 时, 可靠指标的均值为 3.947 323; 当 $\gamma_w = 1.20$ 、 $\gamma_R = 1.25$ 时, 可靠指标的均值为 4.061 237, 略大于 4.0。由此可见, 现行《码头结构设计规范》中有关板桩码头“踢脚”稳定性的表达式可以适用于板桩式坞墙, 而且《船厂水工工程设计规范》考虑到干船坞水压力较大, 已将 γ_w 取 1.20。但 $\gamma_w = 1.05$ 、 $\gamma_R = 1.25$ 对于坞墙也是可行的, 只是可靠指标相比于 $\gamma_w = 1.20$ 、 $\gamma_R = 1.25$ 时略小。

3 结 论

1)板桩式坞墙“踢脚”稳定性的目标可靠指标应取 4.0, 可作为板桩式坞墙按可靠指标设计时的依据。

2)综合分析计算结果, 按现行规范设计的“踢脚”稳定性的可靠指标略大于 4.0, 说明规范采用的板桩码头的分项系数表达式可以适用于板桩式坞墙, 而且水压力分项系数 γ_w 取 1.05 时的可靠指标也略大于 4.0, 说明对于板桩式坞墙稳定性验算时水压力分项系数取该值也是可行的。

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

(上接第 184 页)

[2] 上海现代建筑设计(集团)有限公司.地基基础设计规范: DGJ 08-11—2010[S].上海: 上海市建筑建材业市场管理总站, 2010.

[3] 南京工业大学, 化学工业岩土工程有限公司.复合桩基础设计规范: HG/T 20709—2017[S].北京: 科学技术文献出版社, 2018.

[4] 宰金珉.桩土明确分担荷载的复合桩基及其设计方

程结构可靠度[M].北京: 人民交通出版社, 1992.

[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.

[3] 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): 8-13.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 李荣庆, 贡金鑫, 杨丽民.板桩码头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.

[7] 刘芸芸, 贡金鑫.波浪力重力式码头稳定性可靠指标的简化计算[J].水运工程, 2014(9): 64-70.

[8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司.码头结构设计规范: JTS 167—2018[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 长江航运规划设计院.船厂水工工程设计规范: JTS 190—2018[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[10] 交通部水运规划设计院.干船坞设计规范(水工结构): JTJ 252—1987[S].北京: 人民交通出版社, 1987.

[11] 高树飞, 贡金鑫, 刘永绣, 等.扶壁式坞墙稳定性可靠度分析和分项系数法设计[J].水利水运工程学报, 2014(2): 17-25.

[12] 陈万佳.港口水工建筑物[M].北京: 人民交通出版社, 1989.

[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.

(本文编辑 王璁)

法[J].建筑结构学报, 1995(4): 66-74.

[5] 周峰, 刘壮志, 赵敏艳.软土地区复合桩基础适用条件的探讨[J].水文地质工程地质, 2010, 37(2): 87-90.

[6] 杨杰, 马兴华, 黄荳荳.低桩承台挡土墙基础结构设计计算[J].水运工程, 2012(12): 74-77, 82.

(本文编辑 武亚庆)