无波浪力重力式码头稳定性可靠指标的简化计算

刘芸芸，贡金鑫
（大连理工大学 土木工程学院，辽宁 大连 116024）

摘要：研究了无波浪力情况下重力式码头的抗滑、抗倾稳定性可靠指标的简化计算方法和简化设计方法. 通过Monte-Carlo模拟和统计分析，确定了重力式码头抗滑、抗倾稳定性计算中抗力和荷载效应的统计参数和概率分布；提出了抗滑、抗倾稳定性可靠指标的简化计算方法和计算式，并根据11个方块码头、8个扶壁码头和25个沉箱码头的JC法可靠指标计算结果分析确定了简化计算式和简化设计式的系数. 研究表明，同类型重力式码头抗滑、抗倾稳定性计算中抗力和荷载效应的均值系数和变异系数基本为常数；采用简化式计算的重力式码头抗滑、抗倾稳定性可靠指标与JC法的计算结果非常接近.

关 键 词：重力式码头；稳定性；可靠指标；简化计算；设计方法
中图分类号：U656.1^{+}11 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-640X(2013)06-0036-11

重力式码头是我国分布较广、使用较多的一种码头结构形式，其结构坚固、耐久性好，抗冻性能好，施工比较简单，维修费用少，深受港务部门和施工单位的欢迎. 抗滑、抗倾稳定性验算是重力式码头设计的重要内容之一，传统的验算方法是安全系数方法. 20世纪90年代以来，随着结构可靠度理论和应用研究的成熟，重力式码头抗滑、抗倾验算的安全系数方法被以可靠度为基础的分项系数法取代[1-7]. 新颁布的《重力式码头设计与施工规范》(JTS 167-2-2009)[8]则根据修订专题“重力式码头抗滑、抗倾稳定性按可靠指标设计的方法”[9]的研究成果，进一步完善了重力式码头的抗滑、抗倾稳定性验算方法，在附录D规定了重力式码头“抗滑、抗倾稳定性按可靠指标的设计”方法，促进了重力式码头设计向更合理的方向发展.

规范附录D的抗滑、抗倾稳定性按可靠指标的设计采用的是考虑随机变量概率分布的一次二阶矩方法，即JC方法. 但一次二阶矩法的计算过程比较复杂，一般需要进行迭代计算，这就大大增加了计算的复杂程度. 从工程应用的角度考虑，在保证工程精度要求的条件下，提出不需要迭代、便于工程应用的可靠指标简化计算方法，是工程设计的强烈要求. 一些文献也曾对重力式码头抗滑、抗倾稳定性的可靠指标简化计算方法进行了研究，提出了可靠指标的简化计算方法[10]，但提出的公式缺乏理论解释. 另外，提出的简化公式计算仍比较复杂，工程设计人员应用仍有一定的困难.

根据重力式码头抗滑、抗倾稳定性的特点，在理论研究的基础上，通过对11个方块码头、8个扶壁码头和25个沉箱码头的分析，提出了重力式码头抗滑、抗倾稳定性可靠指标的简化计算和设计方法. 本文的基本思路是，首先确认重力式码头抗滑、抗倾稳定性抗力和荷载效应的概率分布，然后给出可靠指标的简化计算公式，以JC法的计算结果作为优化目标优化确定简化公式中的参数. 本文方法只适用于无波浪力的情况，有波浪力情况的可靠指标简化计算和设计方法另文介绍.

收稿日期：2013-06-25
基金项目：交通运输部西部交通建设科技项目(2011 328 823 1510)
作者简介：刘芸芸(1991-)，男，安徽芜湖人，硕士研究生，主要从事港口工程结构设计方法研究.
E-mail：Lyy19911225@163.com

1　重力式码头抗滑、抗倾稳定性的统计分析

1.1　抗力和荷载效应的统计参数

分析结构的可靠度，首先需要建立结构的功能函数. 重力式码头抗滑、抗倾稳定性的功能函数可表示为

$$Z = R - S \tag{1}$$

式中：R 为抗力，表示重力式码头的抗滑力或抗倾力矩；S 为荷载效应，表示重力式码头的滑动力或倾覆力矩. 对于方块、扶壁和沉箱重力码头，R 和 S 的表达式如表 1[9] 所示. 表 1 中各变量的含义如下：G 为结构自重力；E_{H}，E_{V} 分别为填料产生的主动土压力的水平分力和竖向分力；$E_{q\mathrm{H}}$，$E_{q\mathrm{V}}$ 分别为码头面均布荷载产生的主动土压力的水平分力和竖向分力；P_{RH} 为系缆力水平分力；P_{W} 为剩余水压力；M_G 为自重引起的抗倾力矩；$M_{E_{\mathrm{H}}}$，$M_{E_{\mathrm{V}}}$ 分别为填料产生的主动土压力引起的倾覆力矩和抗倾力矩；$M_{E_{q\mathrm{H}}}$，$M_{E_{q\mathrm{V}}}$ 分别为码头面均布荷载产生的主动土压力引起的倾覆力矩和抗倾力矩；$M_{P_{\mathrm{R}}}$ 为系缆力引起的倾覆力矩；$M_{P_{\mathrm{W}}}$ 为剩余水压力引起的倾覆力矩；f 为摩擦系数；K_{P1} 为主动土压力计算模型不确定系数；K_{P2} 为抗倾力矩计算模型不确定系数. 这些变量中包含码头墙体重度 γ_C、墙后回填料重度 γ、填料内摩擦角 φ、堆货荷载 q、摩擦系数 f、主动土压力计算模型不确定系数 K_{P1}、抗倾力矩计算模型不确定系数 K_{P2} 等随机变量，各随机变量的统计参数和概率分布见文献[8]的附录 D.

表 1　重力式码头抗力和荷载效应表达式

Tab. 1　Expressions of the load and resistance for gravity quay

码头形式	破坏形式	R	S
方块	抗滑	$(G_i + E_{\mathrm{V}_i} \times K_{P1} + E_{q\mathrm{V}_i}) \times f$	$E_{\mathrm{H}_i} \times K_{P1} + E_{q\mathrm{H}i} + P_{\mathrm{RH}i}$
	抗倾	$(M_{G_i} + M_{E_{\mathrm{V}i}} \times K_{P1} + M_{E_{q\mathrm{V}i}} \times K_{P2})$	$M_{E_{\mathrm{H}i}} \times K_{P1} + M_{E_{q\mathrm{H}i}} + M_{PR_i}$
扶壁	抗滑	$G \times f$	$E_{\mathrm{H}} \times K_{P1} + P_{\mathrm{W}} + E_{q\mathrm{H}} + P_{\mathrm{RH}}$
	抗倾	$M_G \times K_{P2}$	$M_{E_{\mathrm{H}}} \times K_{P1} + M_{P_{\mathrm{W}}} + M_{E_{q\mathrm{H}}} + M_{P_R}$
沉箱	抗滑	$(G + E_{\mathrm{V}} \times K_{P1} + E_{q\mathrm{V}}) \times f$	$E_{\mathrm{H}} \times K_{P1} + E_{q\mathrm{H}} + P_{\mathrm{RH}}$
	抗倾	$(M_G + M_{E_{\mathrm{V}}} \times K_{P1} + M_{E_{q\mathrm{V}}}) \times K_{P2}$	$M_{E_{\mathrm{H}}} \times K_{P1} + M_{E_{q\mathrm{H}}} + M_{P_R}$

注：方块码头计算表达式中的下标 i 表示的是第 i 层计算面.

如果将抗力 R 和荷载效应 S 用 Y 表示，R 和 S 表达式中包含的各随机变量 γ_C，γ，φ，q，f，K_{P1}，K_{P2} 等分别用 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 表示，即 $Y=h(X_1, X_2, \cdots, X_n)$，则应用近似求随机变量函数平均值和标准差的原理[11]，Y 的平均值和标准差为

$$\mu_Y = h(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \cdots, \mu_{X_n}), \quad \sigma_Y = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial h}{\partial X_i} \bigg|_{\mu_X} \sigma_{X_i} \right)^2} \tag{2}$$

Y 的标准值为将 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 的标准值 $X_{1\mathrm{k}}, X_{2\mathrm{k}}, \cdots, X_{n\mathrm{k}}$ 代入函数 $h(X_1, X_2, \cdots, X_n)$ 后得到的值，即

$$Y_{\mathrm{k}} = h(X_{1\mathrm{k}}, X_{2\mathrm{k}}, \cdots, X_{n\mathrm{k}}) \tag{3}$$

Y 的均值系数 k_Y 和变异系数 δ_Y 为

$$k_Y = \frac{\mu_Y}{Y_{\mathrm{k}}}, \quad \delta_Y = \frac{\sigma_Y}{\mu_Y} \tag{4}$$

以一座 5 万 t 级沉箱码头为例[12]，按照式(2)和(3)分别计算出码头抗滑、抗倾情况下抗力和荷载效应的平均值 μ_R，μ_S，标准差 σ_R，σ_S 以及标准值 R_{k}，S_{k}，进而利用式(4)计算抗力和荷载效应的均值系数 k_R，k_S 和变异系数 δ_R，δ_S，公式中各随机变量的统计参数取值参见文献[8]的附录 D. 计算结果如表 2 中的“原断面”栏所示. 码头结构断面图见图 1.

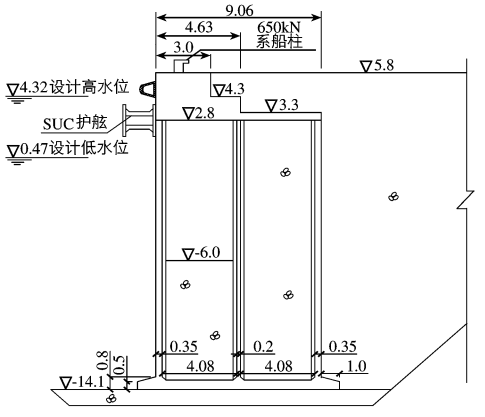


图 1　沉箱码头结构断面(单位：m)

Fig. 1　Sectional drawing of caisson quay (unit: m)

按照重力式码头设计规范中的规定,重力式码头抗滑、抗倾稳定性设计必须满足 $R_d \geqslant S_d$ 的要求,其中 R_d 为码头抗力的设计值,S_d 为码头荷载效应的设计值. 当 $R_d = S_d$ 时,结构刚好满足规范规定的抗滑、抗倾可靠度最低要求,为码头抗滑、抗倾稳定设计的极限状态. 为计算重力式码头设计极限状态时抗力和荷载效应的均值系数和变异系数,对原设计图纸断面各部分尺寸按照相同的比例进行缩减,直到满足 $R_d = S_d$ 为止. 然后计算缩减断面后抗力和荷载效应均值系数 k_R,k_S 和变异系数 δ_R,δ_S,计算结果如表 2 中的"缩减断面"栏所示.

表 2 沉箱码头抗力和荷载效应的统计参数计算结果

Tab. 2 Statistical parameters of load effects and resistances of the caisson quay

参 数	原 断 面				缩减断面			
	抗滑/ kN		抗倾/ (kN·m)		抗滑/ kN		抗倾/ (kN·m)	
	高水位	低水位	高水位	低水位	高水位	低水位	高水位	低水位
μ_R	1 241.987	1 398.724	12 167.611	13 758.221	580.271	671.127	5 125.039	5 971.946
σ_R	54.409	61.198	872.861	986.650	25.724	29.716	369.364	430.277
μ_S	440.082	512.073	3 511.646	4 115.977	440.082	512.073	3 505.479	4 109.972
σ_S	56.565	65.771	429.683	505.279	56.565	65.771	429.683	505.279
R_k	1 231.717	1 388.286	13 501.267	15 271.446	576.783	667.328	5 695.802	6 637.109
S_k	448.454	518.380	3 627.888	4 215.072	448.454	518.380	3 621.721	4 209.067
k_R	1.008	1.010	0.901	0.901	1.006	1.006	0.900	0.900
k_S	0.981	0.983	0.968	0.976	0.981	0.988	0.968	0.976
δ_R	0.044	0.044	0.072	0.072	0.044	0.044	0.072	0.072
δ_S	0.129	0.126	0.122	0.123	0.129	0.128	0.123	0.123

按照相同的方法,计算 11 个方块码头、8 个扶壁码头和 25 个沉箱码头抗滑、抗倾情况下抗力和荷载效应的均值系数 k_R,k_S 和变异系数 δ_R,δ_S,并对计算结果进行统计分析,分析结果列于表 3[13].

表 3 抗力和荷载效应的统计参数

Tab. 3 Statistical parameters of the load effects and resistances

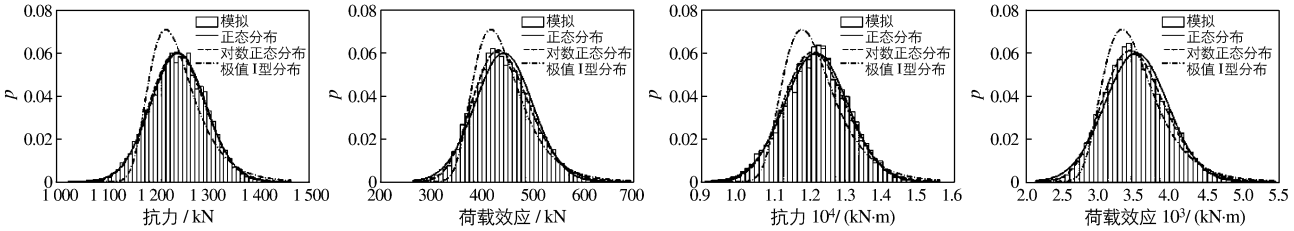
码头形式	码头后填料	破坏形式	原 断 面				缩减断面			
			k_R	k_S	δ_R	δ_S	k_R	k_S	δ_R	δ_S
方块码头	石	抗滑	1.036	0.973	0.042	0.111	1.034	0.971	0.042	0.113
		抗倾	0.923	0.964	0.072	0.092	0.922	0.964	0.072	0.094
扶壁码头	砂	抗滑	1.030	0.942	0.047	0.067	1.030	0.942	0.047	0.067
		抗倾	0.924	0.942	0.074	0.059	0.924	0.942	0.074	0.059
沉箱码头	石	抗滑	1.009	0.985	0.044	0.126	1.006	0.985	0.044	0.126
		抗倾	0.902	0.975	0.072	0.115	0.901	0.974	0.072	0.116
	砂	抗滑	1.018	0.935	0.044	0.082	1.017	0.935	0.044	0.082
		抗倾	0.914	0.930	0.072	0.079	0.912	0.929	0.072	0.079

由表 3 可以看出,对于每种类型的重力式码头,在相同的墙后填料情况下,按"原断面"计算的抗力 R 的均值系数 k_R 和变异系数 δ_R 及荷载效应 S 的均值系数 k_S 和变异系数 δ_S 非常接近,按"缩减断面"计算的抗力 R 的均值系数 k_R 和变异系数 δ_R 及荷载效应 S 的均值系数 k_S 和变异系数 δ_S 也非常接近;同时还可以看出,对于按"原断面"和按"缩减断面"计算的抗力 R 的均值系数 k_R 和变异系数 δ_R 及荷载效应 S 的均值系数 k_S 和变异系数 δ_S 同样非常接近. 因此,对于每种类型的重力式码头,在相同的墙后填料情况下,可认为抗力 R 的均值系数 k_R 和变异系数 δ_R 及荷载效应 S 的均值系数 k_S 和变异系数 δ_S 为常数. 因此,可以近似认为重力式码头抗力和荷载效应的统计参数为常数.

1.2 抗力和荷载效应的概率分布

为建立简化的可靠指标计算公式,需要考虑变量 R 和 S 的概率分布. 为此采用 Monte-Carlo 方法对 R 和 S 进行模拟[11]. 下面是模拟某 5 万 t 级沉箱码头[12]的一种情况,对抗力和荷载效应计算公式中的变量进行

随机抽样，变量的统计参数和概率分布参见文献[8]. 模拟 10 000 次，划分合适的样本区间，画出直方图，分别用正态分布、对数正态分布和极值 I 型分布进行拟合和 χ^2 检验[14]，得到的拟合结果如图 2 所示，拟合优度检验计算结果见表 4.



（a）　沉箱码头抗滑情况模拟　　（b）　沉箱码头抗倾情况模拟

图 2　假定的 3 种概率分布与 Monte-Carlo 模拟结果的比较

Fig. 2　Comparison between results from 3 assumed probability distributions and Monte-Carlo simulation

表 4　抗力和荷载效应的拟合优度检验结果

Tab. 4　Goodness-of-fit test results of the load effects and resistances

破坏形式	统计量	正　态	对数正态	极值 I 型
抗滑	抗力	12.192	36.554	4.163×10^5
	荷载效应	122.967	15.660	9.305×10^4
抗倾	抗力	12.775	60.640	5.809×10^5
	荷载效应	125.659	11.313	3.643×10^4

由图 2 和表 4 可见，该沉箱码头的抗力 R 和荷载效应 S 分别以服从正态分布和对数正态分布拟合效果为最佳. 按照相同的方法对本文列举的 11 个方块码头、8 个扶壁码头和 25 个沉箱码头进行模拟的结果均是如此[13]. 因此对于重力式码头，可以近似认为抗力 R 服从正态分布，荷载效应 S 服从对数正态分布. 另外，在分析过程中还发现，R 和 S 的平均值和标准差的 Monte-Carlo 模拟结果，与式(2)的计算结果差别很小. 说明用式(4)计算的均值系数和变异系数是比较准确的.

2　抗滑、抗倾稳定性可靠指标的简化计算方法

2.1　简化计算式的推导

式(1)为重力式码头抗滑、抗倾稳定性的功能函数表达式，如果抗力 R 和荷载效应 S 均服从正态分布或均服从对数正态分布，则可得到可靠指标的简单解析表达式，否则需要采用 JC 法进行计算，但如前所述，抗力 R 近似服从正态分布，荷载效应 S 近似服从对数正态分布，并不满足这样的要求，所以不能直接采用简化式计算.

由可靠度的基本理论得知，JC 法的基本出发点是将非正态随机变量当量正态化为正态随机变量[15]. 对于式(1)表示的结构功能函数，如果假定 R 服从正态分布，但 S 不服从正态分布，S 当量正态化的随机变量为 S'，则可靠指标计算式可表示为：

$$\beta_1 = \frac{\mu_R - \mu_{S'}}{\sqrt{\sigma_R^2 - 2\rho_{R,S'}\sigma_R\sigma_{S'} + \sigma_{S'}^2}} = \frac{\mu_R - \mu_{S'}}{\sqrt{(\mu_R\delta_R)^2 - 2\rho_{R,S'}(\mu_R\delta_R)(\mu_{S'}\delta_{S'}) + (\mu_{S'}\delta_{S'})^2}} \tag{5}$$

式中：μ_R，σ_R 和 δ_R 为抗力 R 的平均值、标准差和变异系数；$\mu_{S'}$，$\sigma_{S'}$ 和 $\delta_{S'}$ 为当量正态化随机变量 S' 的平均值、标准差和变异系数；$\rho_{R,S'}$ 为 R 和 S' 的相关系数. 由于 R 和 S 均与码头面的堆货荷载及土压力有关，所以，统计上 R 和 S 是相关的.

同样对于式(1)表示的功能函数，如果 S 服从对数正态分布，但 R 不服从对数正态分布，R 当量对数正态化的随机变量为 R'，则可靠指标的计算公式可表示为：

$$\beta_2 = \frac{\mu_{\ln R'} - \mu_{\ln S}}{\sqrt{\sigma_{\ln R'}^2 - 2\rho_{\ln R',\ln S}\sigma_{\ln R'}\sigma_{\ln S} + \sigma_{\ln S}^2}} \tag{6}$$

式中：$\rho_{\ln R',\ln S}$ 为 $\ln R'$ 和 $\ln S$ 的相关系数；$\mu_{\ln R'}$ 和 $\mu_{\ln S}$ 分别为 $\ln R'$ 和 $\ln S$ 的平均值，按下式计算

$$\mu_{\ln R'} = \ln \frac{\mu_{R'}}{\sqrt{1 + \delta_{R'}^2}}, \quad \mu_{\ln S} = \ln \frac{\mu_S}{\sqrt{1 + \delta_S^2}} \tag{7}$$

式中：$\mu_{R'}$ 和 $\delta_{R'}$ 为当量对数正态化随机变量 R' 的平均值和变异系数；μ_S 和 δ_S 为荷载效应 S 的平均值和变异系数；$\sigma_{\ln R'}$ 和 $\sigma_{\ln S}$ 为 $\ln R'$ 和 $\ln S$ 的标准差，按下式计算

$$\sigma_{\ln R'} = \sqrt{\ln(1 + \delta_{R'}^2)}, \quad \sigma_{\ln S} = \sqrt{\ln(1 + \delta_S^2)} \tag{8}$$

将式(7)和(8)代入式(6)得到

$$\beta_2 = \frac{\ln\left(\dfrac{\mu_{R'}}{\mu_S}\sqrt{\dfrac{1 + \delta_S^2}{1 + \delta_{R'}^2}}\right)}{\sqrt{\ln[(1 + \delta_{R'}^2)(1 + \delta_S^2)] - 2\rho_{\ln R',\ln S}\sqrt{\ln(1 + \delta_{R'}^2)\ln(1 + \delta_S^2)}}} \tag{9}$$

当 $\delta_{R'} \leqslant 0.3$，$\delta_S \leqslant 0.3$ 时，式(9)可简化为

$$\beta_2 = \frac{\ln\left(\dfrac{\mu_{R'}}{\mu_S}\right)}{\sqrt{\delta_{R'}^2 - 2\rho_{R',S}\delta_{R'}\delta_S + \delta_S^2}} \tag{10}$$

由于随机变量 X 的统计参数常用其均值系数 k_X 及变异系数 δ_X 表示. 同样，对于抗力 R 和荷载效应 S，其统计特性也可用均值系数 k_R，k_S 和变异系数 δ_R，δ_S 表示，即：

$$k_R = \frac{\mu_R}{R_k}, \delta_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R} \text{ 及 } k_{R'} = \frac{\mu_{R'}}{R_k}, \delta_{R'} = \frac{\sigma_{R'}}{\mu_{R'}}$$

$$k_S = \frac{\mu_S}{S_k}, \delta_S = \frac{\sigma_S}{\mu_S} \text{ 及 } k_{S'} = \frac{\mu_{S'}}{S_k}, \delta_{S'} = \frac{\sigma_{S'}}{\mu_{S'}}$$

这样，式(5)和(10)可进一步表示为

$$\beta_1 = \frac{k_R R_k - k_{S'} S_k}{\sqrt{(k_R R_k \delta_R)^2 - 2\rho_{R,S'}(k_R R_k \delta_R)(k_{S'} S_k \delta_{S'}) + (k_{S'} S_k \delta_{S'})^2}} \tag{11}$$

$$\beta_2 = \frac{\ln\left(\dfrac{k_{R'} R_k}{k_S S_k}\right)}{\sqrt{\delta_{R'}^2 - 2\rho_{R',S}\delta_{R'}\delta_S + \delta_S^2}} \tag{12}$$

令 $k_{S'} = t_S k_S$，$\delta_{S'} = u_S \delta_S$；$k_{R'} = t_R k_R$，$\delta_{R'} = u_R \delta_R$，将其代入式(11)和(12)得

$$\beta_1 = \frac{k_R R_k - t_S k_S S_k}{\sqrt{(k_R R_k \delta_R)^2 - 2\rho_{R,S'}(k_R R_k \delta_R)(t_S k_S u_S \delta_S S_k) + (t_S k_S u_S \delta_S S_k)^2}} \tag{13}$$

$$\beta_2 = \frac{\ln\left(\dfrac{t_R k_R}{k_S} \times \dfrac{R_k}{S_k}\right)}{\sqrt{u_R^2 \delta_R^2 - 2\rho_{R',S} u_R \delta_R \delta_S + \delta_S^2}} \tag{14}$$

式(13)和(14)可进一步表示为

$$\beta_1 = \frac{(R_k/S_k) - a_1}{\sqrt{b_1(R_k/S_k)^2 - c_1(R_k/S_k) + d_1}} \tag{15}$$

$$\beta_2 = a_2 \ln(R_k/S_k) + b_2 \tag{16}$$

其中

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= t_S k_S / k_R, \quad b_1 = \delta_R^2 \\ c_1 &= 2\rho_{R,S'}(t_S u_S \delta_R \delta_S)(k_S/k_R), \quad d_1 = (t_S u_S \delta_S k_S / k_R)^2 \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

$$\left.\begin{aligned} a_2 &= \frac{1}{\sqrt{u_R^2\delta_R^2 - 2\rho_{R',S}u_R\delta_R\delta_S + \delta_S^2}} \\ b_2 &= \frac{\ln(t_R k_R/k_S)}{\sqrt{u_R^2\delta_R^2 - 2\rho_{R',S}u_R\delta_R\delta_S + \delta_S^2}} \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

式(15)和(16)即为本文提出的重力式码头抗滑、抗倾稳定性可靠指标的简化计算式，其中式(16)形式上与文献[7]的公式相同. 如表 2 所示，由于 k_R，δ_R 和 k_S，δ_S 均可视为常数，则参数 a_1，b_1，c_1，d_1 及 a_2，b_2 也应为常数.

2.2　简化计算式参数的确定

在式(15)和(16)中，需要确定未知参数 a_1，b_1，c_1，d_1 及 a_2，b_2 的值. 本文按照简化式计算结果与 JC 法计算结果误差最小的原则确定，即按下列公式通过优化分析确定

$$\left.\begin{aligned} \min H_1 &= \sum[\beta_i(a_1,b_1,c_1,d_1) - \beta_{i,\mathrm{JC}}]^2 \\ \min H_2 &= \sum[\beta_i(a_2,b_2) - \beta_{i,\mathrm{JC}}]^2 \end{aligned}\right\} \tag{19}$$

式中：$\beta_i(a_1,b_1,c_1,d_1)$ 为按式(15)计算的可靠指标；$\beta_i(a_2,b_2)$ 为按式(16)计算的可靠指标；$\beta_{i,\mathrm{JC}}$ 为按 JC 法计算的可靠指标.

使用文献[16]中的重力式码头抗滑、抗倾稳定性可靠指标可视化计算程序，计算了 11 个方块码头、8 个扶壁码头和 25 个沉箱码头的可靠指标，计算结果如表 5 所示. 可以看出，所有码头的抗滑可靠指标都不小于规范规定的 3.5 的要求，抗倾可靠指标都不小于规范规定的 4.0 的要求.

表 5　采用 JC 法计算的码头抗滑、抗倾稳定性可靠指标

Tab. 5　Reliability index of gravity quay against sliding and overturning based on JC method

码头形式	码头后填料	抗　滑			抗　倾		
		数量	最小值	最大值	数量	最小值	最大值
方块	石	118	6.484	15.249	118	6.542	13.049
扶壁	砂	16	4.814	10.627	16	5.700	10.818
沉箱	石	50	7.007	14.014	50	7.514	12.159
	砂	50	4.959	11.999	50	5.788	11.076

同样，为计算码头刚好满足规范规定的抗滑、抗倾稳定性要求时的最小可靠指标，按照上文所描述的方法，在码头原设计图纸断面尺寸的基础上，按照相同的比例对码头宽度进行缩减，直到满足 $R_\mathrm{d} = S_\mathrm{d}$ 为止，然后采用 JC 法计算码头抗滑、抗倾稳定性的可靠指标，计算结果如表 6 所示.

表 6　码头设计极限状态下抗滑、抗倾稳定性可靠指标

Tab. 6　Minimum reliability index of gravity quay against sliding and overturning under code requirements

码头形式	码头后填料	可靠指标					
		抗　滑			抗　倾		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
方块	石	2.403	2.628	2.507	3.030	3.649	3.143
扶壁	砂	4.009	4.326	4.237	3.993	4.368	4.237
沉箱	石	2.087	2.533	2.221	2.746	3.043	2.852
	砂	3.694	4.169	3.905	3.882	4.324	4.071

由式(19)优化确定的系数 a_1，b_1，c_1，d_1 及 a_2，b_2 如表 7 所示. 由表 7 可以看出，优化分析确定的系数 a_1，b_1，c_1，d_1 及 a_2，b_2 与按表 3 中的 k_R，δ_R 和 k_S，δ_S 根据式(17)和(18)的计算结果并不一定完全一致，如由表 3 中的 δ_R 根据式(17)确定的 b_1 分别为 1.764×10^{-3}，5.184×10^{-3}，2.209×10^{-3}，5.476×10^{-3}，1.936×10^{-3}，5.184×10^{-3}，1.936×10^{-3} 和 5.184×10^{-3}，而优化得到的 b_1 如表 7 所示，这是因为 k_R，δ_R 和 k_S，δ_S 实际上在一个很小的

范围内波动,并不是一个常数,根据假设检验确定抗力 R 服从正态分布、荷载效应 S 服从对数正态分布也是近似的.

表 7 可靠指标简化计算公式中的系数值

Tab. 7 Coefficients for simplified reliability index calculation

码头形式	码头后填料	破坏形式	a_1	b_1	c_1	d_1	a_2	b_2
方块	石	抗滑	0.795	3.482×10^{-3}	0	2.501×10^{-2}	7.190	1.080
		抗倾	0.950	5.030×10^{-3}	0	2.433×10^{-2}	5.514	1.287
扶壁	砂	抗滑	0.792	1.964×10^{-3}	0	1.034×10^{-2}	10.690	1.531
		抗倾	0.914	5.483×10^{-3}	2.303×10^{-3}	1.370×10^{-2}	6.417	1.492
沉箱	石	抗滑	0.828	2.563×10^{-3}	0	3.786×10^{-2}	7.926	0.231
		抗倾	0.742	6.432×10^{-3}	1.512×10^{-2}	9.110×10^{-2}	5.938	0.285
	砂	抗滑	0.831	2.413×10^{-3}	0	1.067×10^{-2}	10.003	1.242
		抗倾	0.884	5.675×10^{-3}	3.926×10^{-3}	2.184×10^{-2}	6.459	1.180

图 3 给出了采用 JC 法对 11 个方块码头、8 个扶壁码头和 25 个沉箱码头计算的可靠指标与根据式(15)和(16)计算的抗滑、抗倾稳定可靠指标的比较.

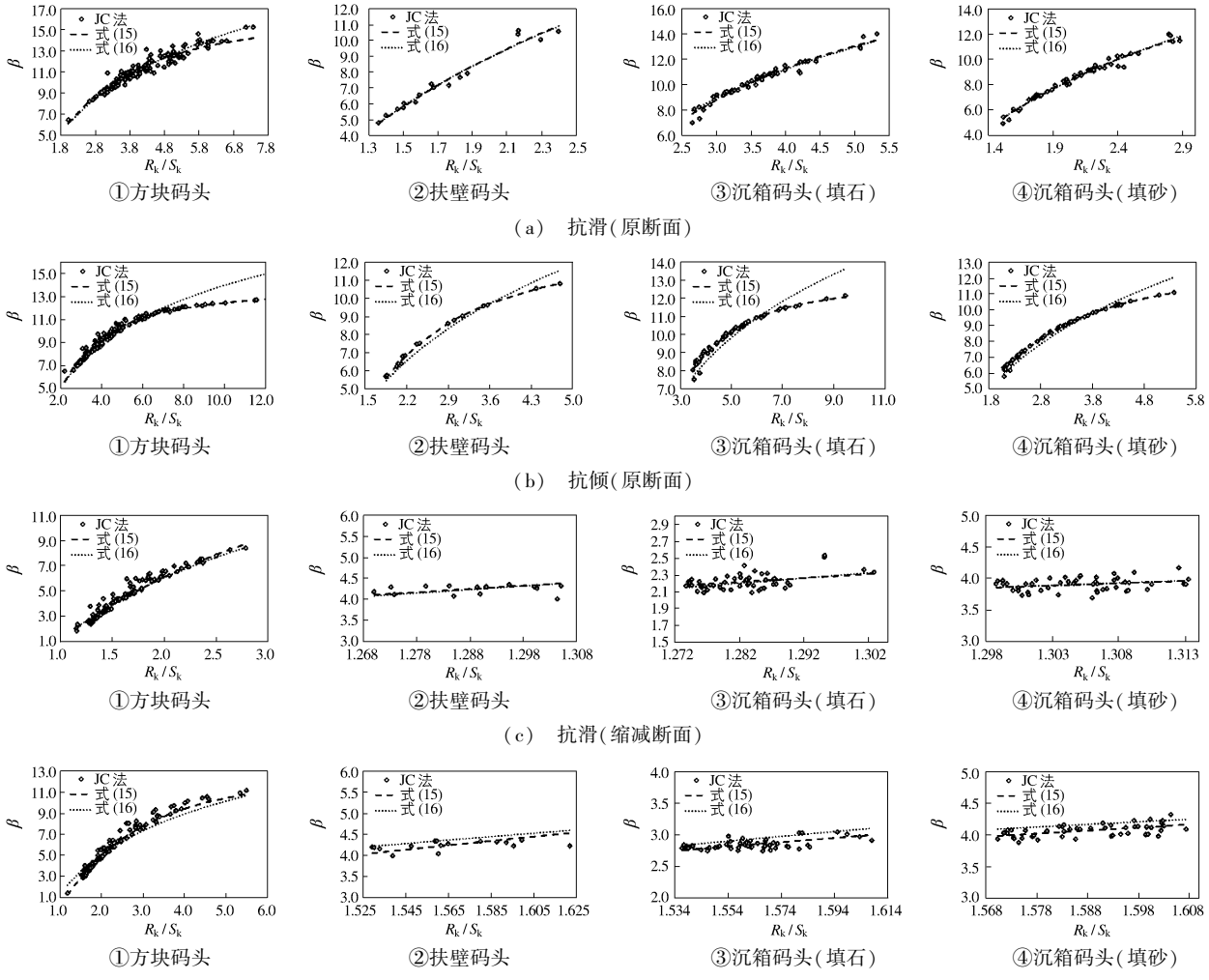


图 3 简化方法计算结果与 JC 法计算结果的比较

Fig. 3 Comparison of calculation results by simplified method and JC method

为进一步验证简化方法的准确程度，令

$$B_1 = \beta_1/\beta_{JC}, \quad B_2 = \beta_2/\beta_{JC} \tag{20}$$

式中：B_1，B_2 为可靠指标的简化公式计算结果与 JC 法计算结果的比值，β_1 为按式(15)计算的可靠指标，β_2 为式(16)计算的可靠指标，β_{JC}为按 JC 法计算的可靠指标.

对 B_1，B_2 的计算结果进行统计分析，得到各类型重力式码头 B_1，B_2 的平均值 μ_{B_1}，μ_{B_2}和变异系数 δ_{B_1}，δ_{B_2}. 计算结果如表 8 所示.

表 8　简化公式计算结果与 JC 法计算结果比值的统计分析

Tab. 8　Statistical analysis of the ratio of simplified calculation to JC method calculation

码头形式	码头后填料	破坏形式	原断面				缩减断面			
			μ_{B_1}	δ_{B_1}	μ_{B_2}	δ_{B_2}	μ_{B_1}	δ_{B_1}	μ_{B_2}	δ_{B_2}
方块	石	抗滑	1.008	0.041	1.001	0.039	1.009	0.094	1.028	0.103
		抗倾	1.015	0.035	0.996	0.054	0.991	0.061	1.047	0.129
扶壁	砂	抗滑	0.999	0.040	1.002	0.040	1.003	0.032	1.000	0.033
		抗倾	0.998	0.013	0.977	0.036	1.003	0.031	1.032	0.027
沉箱	石	抗滑	1.001	0.031	1.004	0.034	1.001	0.036	0.995	0.036
		抗倾	1.000	0.020	0.988	0.046	1.000	0.024	1.031	0.024
	砂	抗滑	1.002	0.031	1.001	0.031	1.000	0.025	1.001	0.025
		抗倾	1.000	0.016	0.984	0.036	1.000	0.019	1.024	0.019

由图 3 可见，使用简化公式计算的重力式码头抗滑、抗倾稳定性的可靠指标，与 JC 法的计算结果相差不大；从表 8 可见，B_1，B_2 的平均值计算结果均非常接近与 1 且变异系数基本都很小，说明可靠指标的简化公式计算结果与 JC 法计算结果都很接近. 以上结果足以证明这两种简化计算方法均是可行的. 同时还可看出，简化公式不但适用于缩减断面前可靠指标的计算，对于缩减断面后的码头，除方块码头由于层数较多、形状较复杂而导致计算结果偏差较大外，对于扶壁码头和沉箱码头，简化计算公式同样适用. 综上所述，对于目前主流的方块式重力码头、扶壁式重力码头以及沉箱式重力码头，上述两种简化计算方法均有很好的适用性，总体来看，式(15)的计算结果要优于式(16).

3　简化可靠指标设计方法

3.1　抗作比计算公式

在重力式码头设计过程中，首先需要对码头的安全性提出要求，然后再根据提出的可靠指标对码头进行设计. 令抗力与作用效应的比值(简称抗作比)为

$$K = R_k/S_k \tag{21}$$

则可由式(15)和(16)得到下面的公式：

$$K_1 = \frac{a_3\beta^2 - \beta\sqrt{b_3 - c_3\beta^2} - d_3}{2 \times (e_3\beta^2 - 1)} \tag{22}$$

$$K_2 = \exp\left(\frac{\beta - b_4}{a_4}\right) \tag{23}$$

式中的系数如表 9 所示，则可采用可靠指标对重力式码头的抗滑、抗倾稳定性进行设计.

用式(22)或(23)对重力式码头的抗滑、抗倾稳定性进行可靠度设计时，首先根据设计要求的抗滑、抗倾稳定性可靠指标 β 计算抗作比 K. 然后根据实际码头结构尺寸和设计条件按标准值计算码头抗滑、抗倾稳定的实际抗作比 K'，如果 $K' \geqslant K$，则码头抗滑、抗倾稳定性满足设计规定的可靠指标设计要求，否则需改变码头断面或采取其他措施.

表 9 可靠指标简化设计公式中的系数值

Tab. 9 Coefficients for simplified reliability index design

码头形式	码头后填料	破坏形式	a_3	b_3	c_3	d_3	e_3	a_4	b_4
方块	石	抗滑	0	0.109	3.483×10^{-4}	1.590	3.482×10^{-3}	7.190	1.080
		抗倾	0	0.115	4.894×10^{-4}	1.900	5.030×10^{-3}	5.514	1.287
扶壁	砂	抗滑	0	4.629×10^{-2}	8.125×10^{-5}	1.584	1.964×10^{-3}	10.690	1.531
		抗倾	2.303×10^{-3}	6.470×10^{-2}	2.951×10^{-4}	1.828	5.483×10^{-3}	6.417	1.492
沉箱	石	抗滑	0	0.158	3.881×10^{-4}	1.655	2.563×10^{-3}	7.926	0.231
		抗倾	1.521×10^{-2}	0.333	2.112×10^{-3}	1.484	6.432×10^{-3}	5.938	0.285
	砂	抗滑	0	4.933×10^{-2}	1.030×10^{-4}	1.662	2.413×10^{-3}	10.003	1.242
		抗倾	3.926×10^{-3}	9.123×10^{-2}	4.804×10^{-4}	1.768	5.675×10^{-3}	6.459	1.180

3.2 设计算例

某工程为一座 5 万 t 级多用途沉箱码头[12],码头结构断面见图 1. 码头顶面高程 5.8 m,码头前沿水深 −14.1 m;设计高水位 4.32 m,设计低水位 0.47 m;码头面均布荷载 $q=30$ kPa;系缆力标准值 650 kN;码头后填料按回填块石和回填中砂两种情况考虑. 材料重度和内摩擦角标准值见文献[8]. 按照现行规范的要求,二级重力式码头抗滑的可靠指标 β_H 不小于 3.5,抗倾的可靠指标 β_Q 不小于 4.0. 采用可靠指标方法对码头进行抗滑、抗倾稳定性设计.

沉箱码头抗滑、抗倾稳定的抗作比按下列公式计算

$$K'_H=\frac{(G+E_V+E_{qV})\times f}{E_H+E_{qH}+P_{RH}},\quad K'_Q=\frac{M_G+M_{E_V}+M_{E_{qV}}}{M_{E_H}+M_{E_{qH}}+M_{P_R}} \tag{24}$$

式中:K'_H,K'_Q 分别为码头抗滑、抗倾稳定性的抗作比.

码头后回填块石和回填中砂,不同水位下沉箱码头抗滑、抗倾稳定抗作比计算结果如表 10 所示.

采用式(22)和(23)计算给定可靠指标下的抗作比. 表 11 为抗滑可靠指标 β_H 为 3.5、抗倾可靠指标 β_Q 为 4.0 时码头抗滑、抗倾稳定的抗作比.

由表 10 和 11 可以看出,在码头后填料为块石和中砂的情况下,无论是设计高水位还是设计低水位,均有 $K'_H>K_H$ 和 $K'_Q>K_Q$,说明该沉箱码头抗滑、抗倾稳定性满足规范规定的可靠指标要求.

表 10 沉箱码头抗作比计算结果

Tab. 10 Results of the ratio of resistance to load of caisson quay

破坏形式	填 石		填 砂	
	设计高水位	设计低水位	设计高水位	设计低水位
抗滑 K'_H	2.747	2.678	1.599	1.521
抗倾 K'_Q	3.722	3.623	2.218	2.108

表 11 满足规范可靠指标要求的抗作比

Tab. 11 The ratio of resistance to load satisfying code requirement

码头后填料	抗滑 K_H		抗倾 K_Q	
	式(22)	式(23)	式(22)	式(23)
石	1.562	1.510	1.911	1.869
砂	1.252	1.253	1.574	1.547

另外,由表 11 可以看出,对于不同的码头后填料,相同可靠指标下要求的抗作比是不同的,这是因为不同填料的材料参数的变异性是不同的. 采用可靠指标方法进行设计的优点,就是反映了材料性能变异性的差别.

4 结　语

本文通过计算分析，提出了两种重力式码头抗滑、抗倾稳定性可靠指标的简化计算方法和简化设计方法. 使用简化公式计算的重力式码头抗滑、抗倾稳定性可靠指标与 JC 法的计算结果相差不大，可以用于重力式码头抗滑、抗倾稳定性可靠指标的简化计算和设计.

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.（Drafter of "Unified standards for reliability design of port engineering structures". Reliability of port engineering structures[M]. Beijing: People's Communication Press, 1992.（in Chinese））

[2] 邱驹. 港工建筑物[M]. 天津：天津大学出版社，2002.（QIU Ju. Port and harbor structures[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002.（in Chinese））

[3] 彭大鹏. 重力式码头水平滑动稳定性的可靠度分析[J]. 水运工程，1988(4)：27-31.（PENG Da-peng. Reliability analysis of sliding horizontally of gravity quay[J]. Port & Waterway Engineering, 1988(4): 27-31.（in Chinese））

[4] 王浩芬，刘锡岭. 重力式码头抗滑、抗倾稳定性的可靠度分析[J]. 水运工程，1992(2)：52-58.（WANG Hao-fen, LIU Xi-ling. Reliability analysis of gravity quay against sliding and overturning[J]. Port & Waterway Engineering, 1992(2): 52-58.（in Chinese））

[5] 王浩芬. 重力式码头抗倾、抗滑稳定分析的极限状态表达式及其分项系数的确定[J]. 华南港工，2000(1)：36-43.（WANG Hao-fen. Determination of the limit state equation and partial factor of gravity quay against sliding and overturning[J]. South China Harbor Engineering, 2000(1): 36-43.（in Chinese））

[6] 麦远俭. 重力式码头设计方法与施工关键技术[J]. 华南港工，2005(3)：6-8.（MAI Yuan-jian. Design and key construction technology of gravity quay[J]. South China Harbor Engineering, 2005(3): 6-8.（in Chinese））

[7] 麦远俭，叶建科. 重力式码头抗滑抗倾稳定性验算的抗力变异系数及对分项系数的修订建议[J]. 水运工程，2013(5)：35-40.（MAI Yuan-jian, YE Jian-ke. Variation coefficient of resistance and revision suggestion on partial factor for checking calculation to anti-sliding and anti-overturn stability of gravity quay[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(5): 35-40.（in Chinese））

[8] 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））

[9]《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.（Drafter of "Design and construction code for gravity quay". Reliability index design of gravity quay against sliding and overturning[R]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.（in Chinese））

[10] 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，2008(2)：39-45.（WANG Li-huan, GONG Jin-xin, LI Rong-qin, et al. Simplified method for analyzing the reliability of stability of gravity quay[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(2): 39-45.（in Chinese））

[11] 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.（GONG Jin-xin, WEI Wei-wei. Principle of reliability design of engineering structures[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.（in Chinese））

[12] 交通部第一航务工程勘察设计院. 港口工程结构设计算例[M]. 北京：人民交通出版社，1999.（CCCC First Harbor Consultants CO, LTD. Practice and examples of port and harbor design[M]. Beijing: People's Communication Press, 1999.（in Chinese））

[13] 贡金鑫，刘芸芸. 重力式码头抗滑、抗倾稳定性的简化可靠指标计算方法[R]. 大连：大连理工大学，2013.（GONG Jin-xin, LIU Yun-yun. Simplified methods for reliability index calculation of gravity quay against sliding and overturning[R]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.（in Chinese））

[14] 滕素珍，冯敬海. 数理统计学[M]. 大连：大连理工大学出版社，2005.（TENG Su-zhen, FENG Jing-hai. Mathematical statistics[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005.（in Chinese））

[15] 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.（GONG Jin-xin. Computational methods for reliability of engineering structures[M]. Dalian：Dalian University of Technology Press，2003.（in Chinese））

[16] 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.（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)：8-13.（in Chinese））

Simplified methods for reliability index calculation of gravity quay stability without wave force

LIU Yun-yun，GONG Jin-xin

（*Department of Civil Engineering*，*Dalian University of Technology*，*Dalian* 116024，*China*）

Abstract：The simplified methods for reliability index calculation and design of the gravity quay against sliding and overturning without wave force is investigated in the study. Probabilistic distribution and statistical parameters of the load and resistance regarding sliding and overturning are established through Monte-Carlo simulation and statistical analysis；and the simplified methods and expressions for the reliability index calculation of the gravity quay against sliding and overturning are put forward. Coefficients in the simplified reliability index expressions are determined through reliability analysis of 11 block quays，8 buttressed quays and 25 caisson quays using JC method. The research results indicate that for the same type of the gravity quay，the bias and variation coefficients of the load effects and resistances for sliding and overturning are approximately identical. The results of reliability index obtained by simplified expressions are very close to the results obtained by JC method.

Key words：gravity quay；stability；reliability index；simplified method；design method

交通运输部应用基础研究项目“枢纽泄流过程与下游滩槽演变互动关系研究”成果通过鉴定验收

由南京水科院港口航道泥沙工程交通行业重点实验室承担的交通运输部应用基础研究项目(重点平台)“枢纽泄流过程与下游滩槽演变互动关系研究”于2013年9月26日在南京召开成果鉴定验收会.该项目研究促进了重点实验室的学科发展,在人才培养方面发挥了重要作用,验收专家组一致同意项目通过验收.项目研究成果达到国际先进水平.

项目主要进行了三峡枢纽的调节泄流特性分析、下游滩槽演变对枢纽泄流过程的响应关系、坝下边滩段航道控导性工程布置原则及控导性工程下滩槽演变趋势等研究.项目成果具有创新性,并成功应用于长江中游荆江河段航道整治工程--铁铺至熊家洲段航道整治工程的前期及工程设计.对受枢纽泄流影响下的其它航道整治工程的设计与航道维护有重要的参考价值,具有广阔的应用前景.

摘自南京水利科学研究院网站