

重力式码头基床遭水流冲刷后的稳定性分析

孙熙平, 张宝华, 张 强, 王笑难

(交通部天津水运工程科学研究所 水工构造物检测、诊断与加固技术交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘 要: 在对北方港口进行检测评估时, 发现了多起因拖轮起停产生大水流冲刷破坏抛石基床而危及码头使用安全的案例, 这种破坏形式在以往设计规范中并未涉及, 规范中也未规定相应的防范措施。针对某实际工程, 利用规范法和有限元法分别对抛石基床遭水流冲刷破坏后码头的稳定性进行了分析, 并进一步计算了基床冲刷进深的极限值。计算结果表明, 规范法和有限元法计算的结果吻合较好。同时, 对于这种新发现的码头破坏形式, 应引起设计单位和码头使用单位足够的重视。

关键词: 抛石基床; 大流速水流; 规范法; 有限元法; 码头稳定性; 冲刷进深极限值

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Stability analysis of gravity quay when rubble bedding was eroded by water flow

SUN Xi-ping, ZHANG Bao-hua, ZHANG Qiang, WANG Xiao-nan

(Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Safety of Ministry of Communications,
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: When detecting and evaluating the northern ports, some rubble-beddings were eroded by the high speed water-flow generated by tugs at startup, which consequently threatened the safe use of gravity quay. However, these cases were not covered in the previous design standard and the corresponding preventive measures were not provided. Based on a practical engineering, when the rubble bedding was eroded by water flow, the stability of the quay and limit value of the erosion depth are analyzed using standard method and finite element method respectively. It is shown that the results generated by the two methods are in good agreement. Moreover, sufficient attention should be paid by the design units and the quay management units to this newly discovered damage.

Key words: rubble-bedding; high speed water-flow; standard method; finite element method; stability of quay; limit value of erosion depth

1 引 言

近年来, 在对北方一些港口进行检测评估时, 发现了多起重力式码头抛石基床遭水流冲刷破坏而危及码头使用安全的问题。这些抛石基床遭水流冲刷破坏的主要原因是在生产作业中使用了大马力拖轮, 大马力拖轮的螺旋桨在起停时会产生流速很大的水流, 这种水流的流速超过了抛石基床块石原设计的起停流速, 从而对块石产生冲刷、淘蚀, 导致抛石基床破坏^[1]。目前, 各港口都在增大船载吨位, 大多需要有大型拖轮协助调头或靠泊码头作业。因而, 各港口的港作拖轮功率越来越大, 已从过去的 1 300 kW, 提高到现在的 2 600、3 300、4 000 kW。随着拖轮功率的增大, 螺旋桨的推力及尾流速也越

来越大, 这就导致了超出 10~100 kg 块石起停流速工况的发生。

港口作业的大拖轮对抛石基床存在冲刷破坏的现象, 这是以往设计规范所未涉及的, 也严重影响了码头的安全使用, 应引起设计单位和使用单位足够的重视。本文针对某实际工程, 利用规范法和建立的有限元模型^[2-5], 分别对抛石基床遭水流冲刷破坏后码头的稳定性进行了分析, 并进一步计算了基床冲刷进深的极限值, 基床冲刷进深的极限值定义为当水流的冲刷进深达到该值时码头就会发生失稳破坏。

2 工程概况

某沉箱重力式码头是停靠拖轮的工作船码头,

该重力式码头的沉箱带有消浪腔, 码头结构断面如图 1 所示。在对该码头进行检测评估时发现, 由于大型拖轮在起动时螺旋桨会产生流速较大的水流, 因此抛石基床不同程度的存在被冲刷破损的现象。本文采用多波速测深系统对码头前沿水下地形进行了测量, 测量结果如图 2 所示, 并通过潜水探摸和水下摄像确定了抛石基床被冲刷破损的具体情况。检测结果表明, 码头前沿地形和抛石基床普遍存在被冲刷破损的现象, 抛石基床被冲刷的最大空洞高度达 2.7 m, 进深达 2 m, 严重危及码头的使用安全。为进一步确定该码头的安全现状, 通过规范法和有限元法, 分别对抛石基床遭水流冲刷破损后该码头的稳定性和冲刷进深的极限值进行了分析。

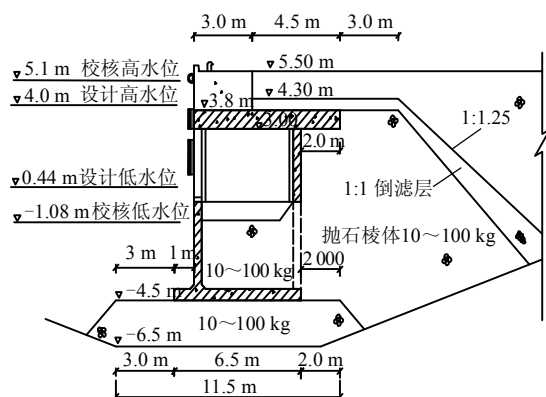


图 1 重力式沉箱结构断面

Fig.1 Structural section of gravity type caisson

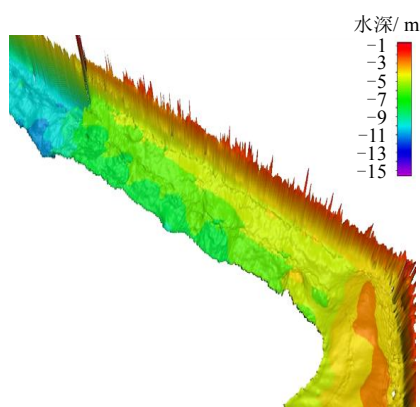


图 2 码头前沿三维数字地形图

Fig.2 Three-dimensional digital map in front of the quay

3 规范法计算

规范法^[6-7]计算的内容包括: 依据《重力式码头设计与施工规范》(JTJ290—98)有关公式, 按照承载能力极限状态, 分别计算在极端高、低水位和设计高、低水位情况下基床遭冲刷破损后沉箱的抗滑、抗倾稳定性以及沉箱的基底应力, 并进一步计

算冲刷进深的极限值。

3.1 参数选取

设计高水位为 4.0 m, 设计低水位为 0.44 m, 校核高水位为 5.1 m, 校核低水位为 -1.08 m。沉箱墙后回填土湿重度 $\gamma_1 = 17 \text{ kN/m}^3$, 浮重度 $\gamma_2 = 7 \text{ kN/m}^3$, 内摩擦角标准值 $\phi_1 = 35^\circ$; 抛石棱体湿重度 $\gamma_3 = 18 \text{ kN/m}^3$, 浮重度 $\gamma_4 = 11 \text{ kN/m}^3$, 内摩擦角标准值 $\phi_2 = 45^\circ$; 沉箱的湿重度为 $\gamma_5 = 25 \text{ kN/m}^3$, 浮重度 $\gamma_6 = 15 \text{ kN/m}^3$ 。码头上作用荷载为堆货荷载和船舶系缆力, 堆货荷载标准值为 $q = 20 \text{ kPa}$, 船舶系缆力标准值 $P = 250 \text{ kN}$ 。

3.2 计算公式

3.2.1 沉箱的抗滑稳定性验算

沿沉箱底面滑动稳定性验算, 不考虑波浪作用, 由可变作用产生的主动土压力为主导可变作用, 抗滑稳定性按下面公式计算:

$$\gamma_0(\gamma_E E_H + \gamma_E E_{qH} + \gamma_{Pw} P_w + \phi \gamma_{PR} P_{RH}) \leq \frac{1}{\gamma_d}(\gamma_G G + \gamma_E E_V + \gamma_E E_{qV})f \quad (1)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数, 一般港口取 $\gamma_0 = 1.0$; γ_E 为土压力分项系数; γ_{Pw} 为剩余水压力分项系数; ϕ 为作用效应组合系数, 持久组合取 0.7, 短暂组合取 1.0; E_H 、 E_V 为码头建筑物在计算面以上的填料、固定设备自重等永久作用所产生的总主动土压力的水平分力和竖向分力的标准值; P_w 为作用在计算面以上的总剩余水压力的标准值; P_{RH} 为系缆力水平分力的标准值; E_{qH} 、 E_{qV} 为码头面上的可变作用在计算面以上产生的总主动土压力的水平分力和竖向分力的标准值; γ_G 为结构自重力的分项系数, 取 1.0; G 为计算面以上的结构自重力标准值; f 为沿计算面的摩擦系数设计值; γ_d 为结构系数, 不考虑波浪作用, 取 $\gamma_d = 1.0$ 。

3.2.2 沉箱的抗倾稳定性验算

沿沉箱底面倾覆稳定性验算, 不考虑波浪作用, 由可变作用产生的主动土压力为主导可变作用时, 倾覆稳定性按下面公式计算:

$$\gamma_0(\gamma_E M_{EH} + \gamma_E M_{EqH} + \gamma_{Pw} M_{Pw} + \phi \gamma_{PR} M_{RH}) \leq \frac{1}{\gamma_d}(\gamma_G M_G + \gamma_E M_{EV} + \gamma_E M_{EqV}) \quad (2)$$

式中: M_G 为结构自重力标准值对计算面前趾的稳定力矩; M_{EH} 、 M_{EV} 为码头墙体后回填料所产生的土压力水平分力和竖向分力标准值对计算面前趾的倾覆和稳定力矩; M_{Pw} 为剩余水压力标准值对计算面前趾的倾覆力矩; γ_d 为结构系数, 不考虑波浪作

用时, 取 $\gamma_d = 1.25$; M_{EqH} 、 M_{EqV} 为码头面上可作用所产生的土压力的水平分力和竖向分力标准值对计算面前趾的倾覆和稳定力矩; M_{RH} 为系缆力水平分力的标准值对计算面前趾的倾覆力矩。

3.2.3 基底应力的验算

重力式码头建筑物的刚度一般很大, 因此, 可假定其基底应力为直线分布, 采用偏心受压公式计算。当建筑物基底形状为矩形时, 基底应力按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\max} \\ \sigma_{\min} \end{aligned} \right\} = \frac{V_K}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right) \quad (3)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ 分别为码头建筑物基底的极大和最小应力标准值 (kPa); B 为建筑物基底的宽度 (m); V_K 为作用在建筑物基底上竖向合力的标准值 (kN); e 为作用在建筑物基底面上合力标准值的作用点距基底中线的偏心距 (m), $e = 0.5B - \xi$; ξ 为合力作用点距前趾 A 的距离。

对于 ξ 的计算采用下式:

$$\xi = \frac{M_R - M_0}{V_K} \quad (4)$$

式中: M_R 、 M_0 分别为竖向合力标准值和倾覆力标准值对建筑物基底前趾的稳定力矩和倾覆力矩 (kN·m)。

当 $\xi < \frac{B}{3}$ 时, $\sigma_{\min}$ 将为负值, 即将筑物基底与基床顶面之间出现拉应力, 但这种情况是不存在的, 此时基底与基床之间的接触应力将重新分布。假定按三角形分布, 则根据建筑物基底应力的合力与作用在基底上的垂直力合力相等的条件得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{2 V_K}{3 \xi} \\ \sigma_{\min} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$B - 3\xi$ 宽度段的基底应力等于 0。

建筑物基底的极大应力应小于抛石基床的抗力限值, 即满足承载力极限状态设计表达式:

$$\gamma_0 \sigma_{\max} \leq \sigma_r \quad (6)$$

式中: γ_0 一般取 1.0; σ_r 为抛石基床承载力设计值, 一般取 600 kPa。

3.2.4 土压力计算

第 n 层填料顶层的土压力强度可按下式计算:

$$e_n = \left(\sum_{i=0}^{n-1} \gamma_i h_i \right) K_{an}, \text{ 永久作用} \quad (7)$$

$$e_{qn} = q K_{an}, \text{ 可变作用} \quad (8)$$

式中: $K_{an} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2} \right)$; $K_{anx} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2} \right)$ 。

$\cos \delta_n$; $K_{any} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2} \right) \sin \delta_n$; q 为码头面堆

货荷载; γ_i 为第 i 层填料重度标准值, 静水面以上采用湿重度, 静水面以下采用浮重度; h_i 为第 i 层填料厚度标准值; K_a 为主动土压力系数, K_{anx} 、 K_{any} 分别为水平、垂直土压力系数; φ_n 为第 n 层填料内摩擦角标准值; δ_n 为第 n 层填料与墙背的摩擦角, 即外摩擦角标准值;

由于码头墙后有抛石棱体, 此种情况下计算墙后主动土压力时, 可作如下近似处理: 从墙体的后踵作为主动破裂面, 与棱体面交于 M 点, 此点称为出坡点。 M 点以上的土压力按回填土的指标计算, M 点以下的土压力按棱体的指标计算。破裂面与水平面的夹角 θ 一般取 65° 或 62° , 本次计算近似取 $\theta = 60^\circ$ 。沉箱上有卸荷板, 对于这类计算, 取卸荷板底面的填土水平面作为新的地面。卸荷板悬臂段下面的地面上无荷载, 其后的新地面上作用有 $\gamma h + q$ 的均布荷载。

3.2.5 系缆力计算

系缆力垂直于码头岸线方向的水平力标准值 N_x 和垂直于码头面方向的竖向力标准值 N_z 可由下面公式计算:

$$N_x = P \sin \alpha \cos \beta \quad (9)$$

$$N_z = P \sin \beta \quad (10)$$

式中: P 为船舶系缆力标准值; α 为系缆力的水平投影与码头前沿线的夹角, 在实际计算中, 对于海船码头采用 $\alpha = 30^\circ$; β 为系船缆与水平面的夹角, 在实际计算中, 对于海船码头采用 $\beta = 15^\circ$ 。

3.3 计算结果

通过以上公式的计算可知, 基床在未遭受水流冲刷时, 在设计水位和校核水位情况下沉箱均满足抗滑、抗倾稳定性的要求, 且基底应力也满足规范要求。进一步分析可知, 校核低水位是最危险的工作。在原设计计算时, 荷载对沉箱产生的力矩, 不论是稳定力矩, 还是倾覆力矩, 均是对沉箱前趾求矩。当水流冲刷基床时, 基床与沉箱底面的接触面积会减小, 且沉箱倾覆的转动点会随着水流对基床的冲刷而后移, 已不再是沉箱的前趾。由于倾覆转动点的后移, 沉箱的自重由原来完全的抗倾作用会有部分变为倾覆作用, 且系缆力垂直于码头面方向的竖向力也会产生倾覆作用, 因此, 沉箱的安全性会大大降低。

在计算冲刷进深的极限值时, 作如下三方面的假定: ①基床遭水流冲刷破损后, 基床与沉箱底面的接触面积会减小, 但由于作用在接触面上的沉箱的重力等竖向力不变, 同时沉箱与基床间的摩擦系数不变, 因此, 认为沉箱的抗滑力不变; ②由于水流冲刷基床后, 沉箱倾覆的转动点会后移, 当计算作用在沉箱上的倾覆力矩和稳定力矩时, 作用在沉箱上的力要对基床被冲刷最深处的点求矩, 而不再是对沉箱前趾求矩。③在计算基床承载力时, 沉箱底部宽度 B 由沉箱底面与基床实际接触面积的宽度 B' 代替, 并考虑基床局部破坏对偏心矩的影响。基于以上三方面的假设, 逐步增加水流冲刷的进深直至计算到沉箱稳定的极限状态。下面给出校核低水位这种最危险工况的计算结果, 由于假定沉箱的抗滑力不变, 因此, 沉箱在达到稳定极限状态前应满足抗滑稳定性要求, 所以只需计算沉箱的抗倾稳定性和基床极限承载力情况。校核低水位的计算结果如表 1 所示。

表 1 规范法计算结果

Table 1 Results calculated by the standard method

冲刷进深 / m	稳定力矩 / ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{m}$)	倾覆力矩 / ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{m}$)	基床应力 / kPa
0.00	3 758 906	520 527	179
0.50	3 308 069	521 465	208
1.00	2 857 231	524 277	249
1.50	2 406 175	542 227	312
2.00	2 004 369	602 864	414
2.20	1 854 549	638 022	477
2.43	1 710 959	679 409	592
2.50	1 641 500	702 439	619

将计算结果绘制成曲线如图 3、4 所示。

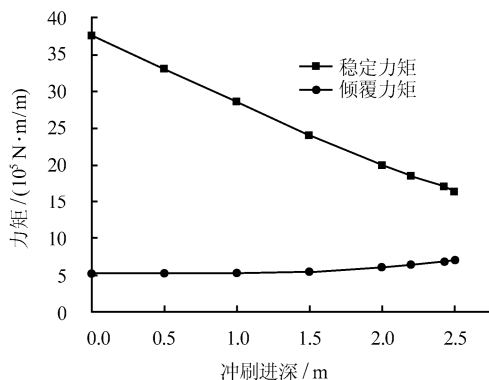


图 3 稳定力矩、倾覆力矩随冲刷进深变化图

Fig.3 Steady moment and overturning moment changed by the erosion depth

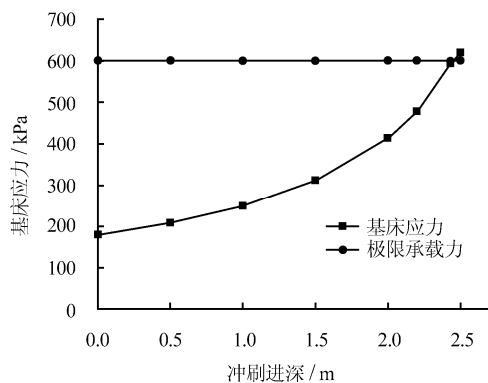


图 4 基床应力随冲刷进深变化图

Fig.4 Stress of rubble-bedding changed by the erosion depth

分析计算结果可知, 当冲刷进深为 2.43 m 时, 虽然稳定力矩仍大于倾覆力矩, 满足抗倾稳定性, 根据假定条件也能满足抗滑稳定性, 但此时基床应力为 592 kPa, 即将达到规范规定的基床极限承载力 600 kPa, 因此认为在校核低水位时冲刷进深的极限值为 2.43 m。同样, 可以计算其他水位时的冲刷进深极限值, 计算结果如表 2 所示。

表 2 各种水位的冲刷进深的极限值

Table 2 Limit value of the erosion depth under various kinds of water levels

计算工况	冲刷进深/ m	计算工况	冲刷进深/ m
校核高水位	2.50	设计低水位	2.58
设计高水位	2.56	校核低水位	2.43

4 有限元法计算

由于在计算冲刷进深的极限值时作了相应的假定, 为得到较为精确的计算结果, 采用有限元软件 ANSYS 建立有限元模型^[8-9], 进一步分析码头基床遭水流冲刷后沉箱的稳定性。通过规范法的计算结果可知, 校核低水位是最危险的工况。在本部分中, 通过建立有限元模型采用逐步增加冲刷进深反复试算的方法, 计算在校核低水位时基床冲刷进深的极限值。

4.1 模型计算参数及断面型式

本次计算选取沉箱一个标准段建立三维有限元模型, 沉箱长 14.5 m, 结构断面型式如图 5 所示。为了模拟整个码头包括地基和墙后填土在工作时的应力、应变状态, 取沉箱前后各 100 m 左右的土体为研究对象, 由于沉箱底面以下 10 m 左右为风化岩, 计算时取风化岩以上的土体为研究对象。由于所选取的土体已足够大, 可近似认为此范围以外的土体不再受沉箱的影响。根据该码头的地质勘察报告和设计资料, 合理的选取土的计算参数, 计算参数如表 3 所示。

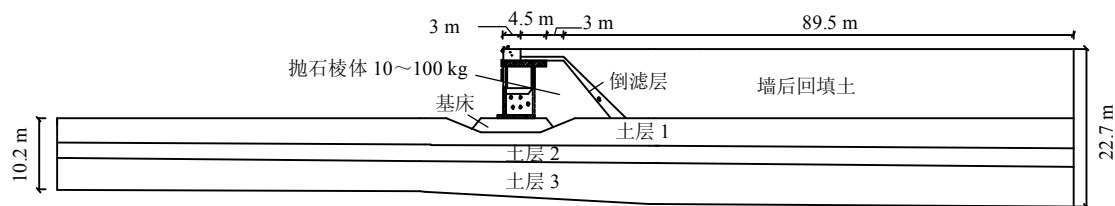


图 5 模型结构断面

Fig.5 Structural section of the model

表 3 计算参数

Table 3 Calculation parameters

材料	弹性模量 / Pa	密度 /(g/cm ³)	泊松比	黏聚力 / Pa	摩擦角 /(°)	膨胀角 /(°)
沉箱	2.5×10^{10}	2.50	0.20			
基床	2.0×10^7	1.80	0.25	0	45	0
土体 1	2.1×10^6	1.83	0.30	18 000	16	20
土体 2	3.0×10^6	1.93	0.30	14 000	24	15
土体 3	3.6×10^6	1.96	0.30	19 000	20	10
回填土	6.4×10^6	1.70	0.30	0	35	8

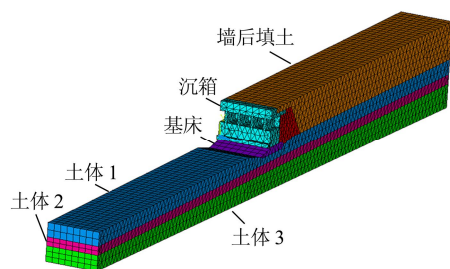


图 6 重力式沉箱码头整体有限元模型图

Fig.6 Whole finite element model of gravity type caisson

4.2 有限元模型主要单元及本构模型

混凝土采用 Solid45 单元, 沉箱和土体之间设置接触单元来模拟沉箱的滑动和倾覆, 接触单元采用面-面的接触单元 Target170 单元和 Contac174 单元。在定义 Target170 单元和 Contac174 单元生成的接触对时应适当将接触刚度定义大一些, 确保沉箱在受力状态下不穿透土层。为模拟沉箱的滑动, 接触面定义为不分开接触, 当沉箱受到的水平力大于摩擦力时, 沉箱就会发生滑动, 摩擦系数根据规范设置为 0.6。通过设定较小的 $FKOP$ 值 (在接触分开时施加的刚度系数) 可模拟接触面的分离, 分离时接触面之间的联系由“软弹簧”联系在一起。

对于沉箱和土的本构模型, 沉箱采用线弹性的本构关系, 土层采用经典的 D-P 模型。

4.3 土体初始应力场的模拟

在土与结构相互作用问题中, 初始地应力场是必须予以重视的问题。为了模拟土体的初始应力场, 在 ANSYS 中施加荷载时, 分两个荷载步进行, 在一个荷载步中只施加重力, 在第 2 个荷载步中再施加其他作用荷载。在结果后处理时, 当分析位移时, 要用第 2 个荷载步的计算结果减去第 1 个荷载步的计算结果, 当分析应力时, 只需读取第 2 个荷载步的计算结果分析即可。

4.4 有限元模型及计算结果分析

采用逐步增加进深反复试算的方法, 分析沉箱的位移、倾角以及基床应力等, 计算在校核低水位时基床冲刷进深的极限值。建立的有限元模型如图 6、7 所示。

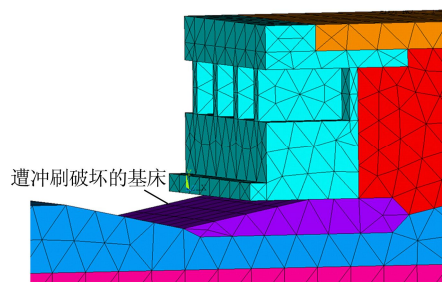


图 7 遭水流冲刷破坏基床的局部放大图

Fig.7 Partial enlargement model of the erosion damaged rubble-bedding

计算结束后, 在 ANSYS 后处理中提取不同冲刷进深条件下沉箱的最大水平位移, 并利用 APDL 语言编写后处理程序, 提取作用在沉箱上的土压力对沉箱产生的倾覆力矩, 程序流程图如图 8 所示。结合规范法的计算内容, 进一步可求得在不同冲刷进深条件下沉箱的倾覆力矩和稳定力矩, 计算结果如表 4 所示, 将计算结果绘制成曲线如图 9~11 所示。

分析计算结果可知, 在校核低水位当冲刷进深达到 3.5 m 时, 基床应力为 596.3 kPa, 即将达到《重力式码头设计与施工规范》^[6]所规定的基床最大允许的承载能力 600 kPa (如图 9 所示)。可以认为, 冲刷进深 3.5 m 是基床应力所允许的最大冲刷进深。由图 10 可知, 此时稳定力矩为 1 032 575 N·m/m, 倾覆力矩为 905 924 N·m/m, 稳定力矩仍大于倾覆力矩。另外, 提取沉箱顶面中点和沉箱前趾中点的倾覆位移, 定义二者之差除以沉箱的高度作为倾覆转角的正切, 计算可得沉箱倾覆转角约为 0.1°。根据《港口工程质量检验评定标准》中规定^[10], 重力

式码头胸墙迎水面暴露面竖向倾斜度允许偏差为 $5H/1\ 000$, H 为胸墙高度。经计算可知, 该码头倾斜度允许偏差为 0.5° , 大于计算的沉箱倾覆转角。综合以上两方面, 可以认为, 冲刷进深为 3.5 m 时该码头仍能保持抗倾稳定性。但值得注意的是, 虽然此时稳定力矩仍大于倾覆力矩, 但二者已很接近, 安全系数已很小。由图 11 可知, 此时沉箱最大的水

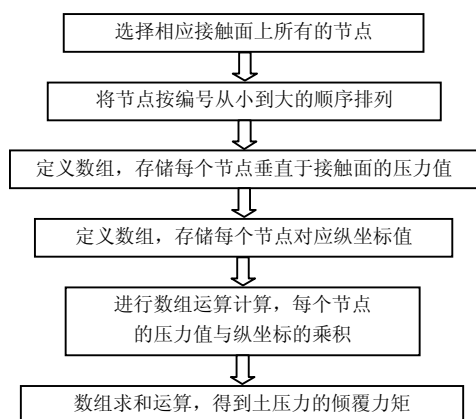


图 8 提取土压力倾覆力矩的程序流程图

Fig.8 Extraction program flow chart of overturning moment generated by earth pressure

表 4 有限元法计算结果

Table 4 The results calculated by finite element method

冲刷进深 / m	稳定力矩 / (N·m/m)	倾覆力矩 / (N·m/m)	基床应力 / kPa	沉箱最大水平位移 / mm
0.0	3 758 906	408 050	327.8	4.64
0.5	3 308 069	408 988	337.9	5.40
1.0	2 857 231	411 800	355.5	6.07
1.5	2 406 175	429 750	381.6	6.65
2.0	2 004 369	490 387	465.6	7.20
2.5	1 641 500	589 962	486.5	7.60
3.0	1 317 569	728 474	572.2	7.85
3.5	1 032 575	905 924	596.3	8.34
3.6	980 249	946 086	608.2	8.97

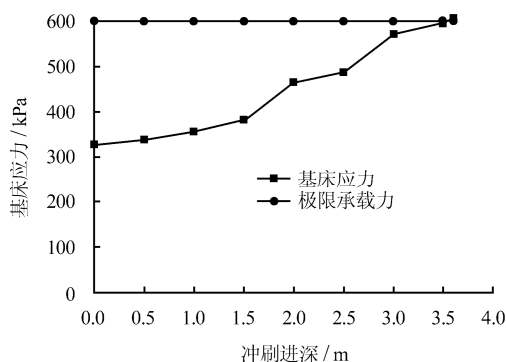


图 9 基床应力随冲刷进深变化图

Fig.9 The stress of rubble-bedding changed by the erosion depth

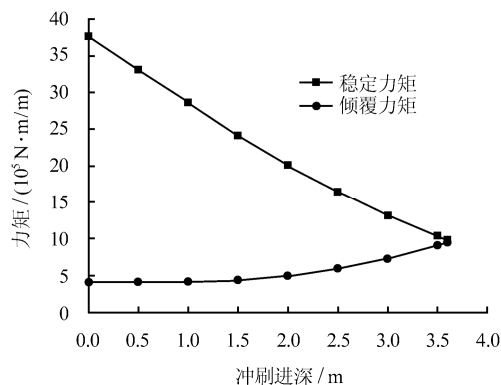


图 10 稳定力矩、倾覆力矩随冲刷进深变化图

Fig.10 Steady moment and overturning moment changed by the erosion depth

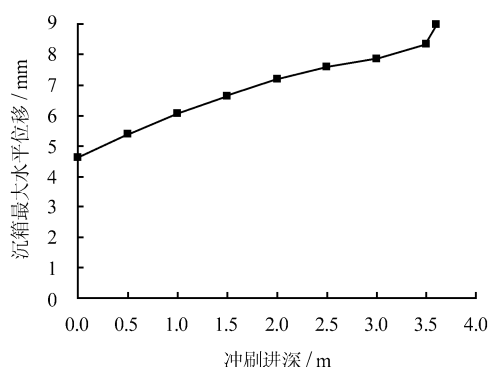


图 11 沉箱最大水平位移随冲刷进深变化图

Fig.11 The maximal horizontal displacements of caisson changed by the erosion depth

平位移为 8.34 mm。工程上可以认为, 沉箱整体上水平位移很小, 故认为沉箱能保持抗滑稳定性要求。

综上分析, 当基床冲刷进深为 3.5 m 时, 沉箱仍能保持抗滑稳定性要求。虽然沉箱也能保持抗倾稳定性要求, 但安全系数已经很小。基床应力即将达到规范中所允许的极限承载力。所以在校核低水位基床冲刷进深的极限值为 3.5 m。

下面给出基床冲刷进深极限值 3.5 m 时整个码头结构的应力和位移云图, 如图 12、13 所示。

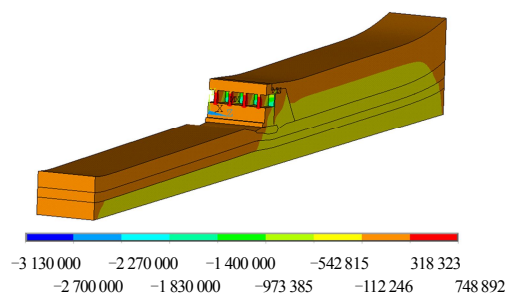


图 12 基床冲刷进深极限值时码头结构的应力云图(单位: Pa)

Fig.12 Stress nephogram of the quay structure when rubble bedding was eroded at limit value (unit: Pa)

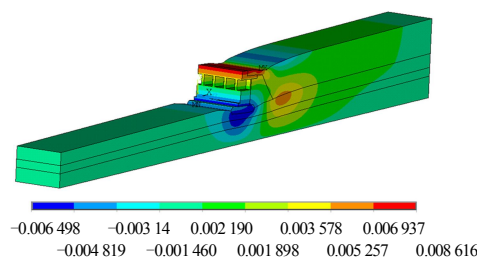


图 13 基床冲刷进深极限值时码头结构的位移云图(单位: m)

Fig.13 Displacement nephogram of the quay structure when rubble bedding was eroded at limit value (unit: m)

5 结 语

针对某实际工程,通过规范法和建立有限元模型两种方法,分别计算了在各种水位情况下基床遭冲刷破损后沉箱的稳定性以及基床冲刷进深的极限值。计算结果表明,基床在未遭受水流冲刷时,在设计水位和校核水位情况下沉箱均满足抗滑、抗倾稳定性的要求,且基底应力也满足规范要求。对于冲刷进深的极限值,规范法的计算值为 2.43 m,有限元法的计算值为 3.5 m,考虑到用规范法计算时乘上了相应的安全系数,可以认为二者计算结果吻合较好。在与潜水测量结果比较后发现,该码头基床最大实测冲刷进深为 2.0 m,小于理论计算得出的基床冲刷进深的极限值,因此,理论推断码头仍处于稳定状态。但如果拖轮启动水流继续冲刷基床,当冲刷进深超过冲刷进深的极限值时,码头将会发生破坏。因此,建议定期对基床进行科学的检测,发现基床冲刷后,应尽可能及时地采用科学手段对基床进行维修加固。

港作大拖轮在启动时产生大水流对抛石基床存在冲刷破损,这是以往设计规范并未涉及的,规范中也未规定相应的防范措施。在对北方码头进行监测评估时,发现了多起这样的案例,基床遭冲刷破损后都严重影响了码头安全使用,应引起设计单位和码头使用单位足够的重视。

参 考 文 献

[1] 朱崇诚,王笑难,孟静. 抛石基床局部遭水冲破坏的诊断与加固[J]. 水道港口, 2008, 29(1): 54—58.
ZHU Chong-cheng, WANG Xiao-nan, MENG Jing. Diagnosis and reinforcement technology for partially damaged rubble base[J]. *Journal of Waterway and*

Harbor, 2008, 29(1): 54—58.

- [2] 梁锴,方理刚,段靓靓. 冲刷对桥墩稳定性影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1643—1645.
LIANG Kai, FANG Li-gang, DUAN Liang-liang. Finite element analysis of influence of scour on stability of piers[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(9): 1643—1645.
- [3] 贺立,别社安,齐越. 重力式码头抛石基床内部滑坡破坏研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 66—70.
HE Li, BIE She-an, QI Yue. Study of slipping in the rubble-bedding of gravity quays[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(1): 66—70.
- [4] 邓宗伟,冷伍明,饶杨安,等. 高速公路桥基岸坡稳定性计算分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 752—758.
DENG Zong-wei, LENG Wu-ming, RAO Yang-an, et al. Computational analysis of stability of bridge foundation slope for expressway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(3): 752—758.
- [5] 曲广琇,康家涛,王华,等. 受冲刷桥梁墩台基础地基承载力试验与墩台承载力研究[J]. 公路工程, 2008, 33(4): 61—66.
QU Guang-xiu, KANG Jia-tao, WANG Hua, et al. Ground bearing capacity test and the study on the stability of the scoured piers[J]. *Highway Engineering*, 2008, 33(4): 61—66.
- [6] 交通部第四航务工程局. JTJ290—98 重力式码头设计与施工规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [7] 天津港湾工程研究所. JTJ250—98 港口工程地基规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [8] ANSYS INC. ANSYS help, release 10.0 documentation for ANSYS[R]. Pittsburgh: U. S. ANSYS Inc., 2005.
- [9] 王勖成. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [10] 交通部第四航务工程局. JTJ221—98 港口工程质量检验评定标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.