



# 船舶撞击力作用下的墩式码头 水工建筑物安全评估

廖德华, 潘新恩, 张建球, 霍世龙

(广西交科集团有限公司, 广西 南宁 530007)

**摘要:** 针对遭受船舶撞击的码头水工建筑物安全评估问题, 结合船舶与码头发生碰撞的实例, 以码头结构现场检测结果为基础, 采用水运、公路、铁路行业规范公式推算失控船舶的撞击力, 计算船舶撞击后的码头水工建筑物稳定性, 综合评估遭受船舶撞击的码头水工建筑物的安全性和适用性, 并给出受损部位修复处理及后续运营期监测措施。结果表明, 被碰撞的码头靠船墩结构安全性评估等级为A级, 结构适用性评估等级为B级。该安全评估方法可为事故鉴定、受损结构修复和码头后期运营提供科学依据和技术支撑。

**关键词:** 重力墩式码头; 水工建筑物; 船舶撞击; 安全评估

中图分类号: U 656.1<sup>+</sup>22

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0038-06

## Safety assessment of hydraulic structure of pier wharf under impact force of ship

LIAO De-hua, PAN Xin-en, ZHANG Jian-qiu, HU Shi-long

(Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China)

**Abstract:** In view of the problem of the safety assessment for the wharf hydraulic structure impacted by ship, we combine with the example of the collision between ship and wharf, and the on-site inspection results of the wharf structure, calculate the impact force of the ship out of control by using three kinds of industry-standard formulas of water transportation, highway and railway, calculate the stability of wharf hydraulic structure impacted by ship, comprehensively evaluate the safety and applicability of wharf hydraulic structure impacted by ship, and put forward the repair treatment of the damaged parts and the monitoring measures in the subsequent operation period. The results show that the safety assessment grade of the pier structure of the impacted wharf is A, and the structural applicability evaluation grade is B. The safety assessment method can provide scientific basis and technical support for accident identification, damaged structure repair, and terminal operation.

**Keywords:** gravity pier wharf; hydraulic structure; ship impact; safety assessment

随着经济和航运业的飞速发展, 船运流量、吨位和速度的逐年增大, 在运输繁忙的航道上, 船舶失控碰撞码头结构的事故频繁发生, 造成码头水工结构与船舶的损伤, 甚至人员伤亡和环境污染。运动中的船舶具有高动量, 与码头结构撞击时会产生巨大的碰撞力, 势必会对码头水工结构造成损伤, 严重影响码头结构的安

全性、适用性和耐久性<sup>[1-2]</sup>。碰撞事故发生后须对受损的码头结构进行检测评估, 为事故鉴定、索赔和受损结构修复及后续运营提供科学依据和技术支撑。以往的船舶碰撞码头研究<sup>[3-5]</sup>主要集中在船舶撞击力下的码头结构动力响应分析, 而缺少从结构检测评估方面进行的相关研究。如何快速地对船舶碰撞事故中的码头进行安全评估成

为现实工作的一个难点。本文以某重力墩式码头遭受失控船舶撞击的工程实例为依托, 对船舶碰撞事故中的受撞击码头水工结构进行快速安全评估分析, 为后续船舶碰撞码头事故检测评估提供技术支撑。

## 1 工程概况

某新建成投入使用仅1年的5万吨级石油码头, 码头水工结构按靠泊8万吨级油船设计, 码头水工建筑物下部采用大圆筒结构, 共有24个圆筒墩,

圆筒上为预制钢筋混凝土盖板和现浇胸墙, 各墩之间用栈桥连接, 码头南邻航运繁忙的10万吨级航道。根据监控资料, 某日夜间有一艘5 000吨级油船在航行至该码头前沿水域时, 因航道退潮水流较急, 船舶失控偏离航道漂移至码头下游端, 在船舶摆正驶离码头前沿过程中, 船首右侧面碰撞码头22#圆筒墩台顶部东南角, 造成护轮坎顶角混凝土破损, 后船舶倒车后退时右侧船舷又刮擦24#圆筒所属的墩台顶面前沿护轮坎, 造成其混凝土刮擦破损。碰撞受损区域见图1。

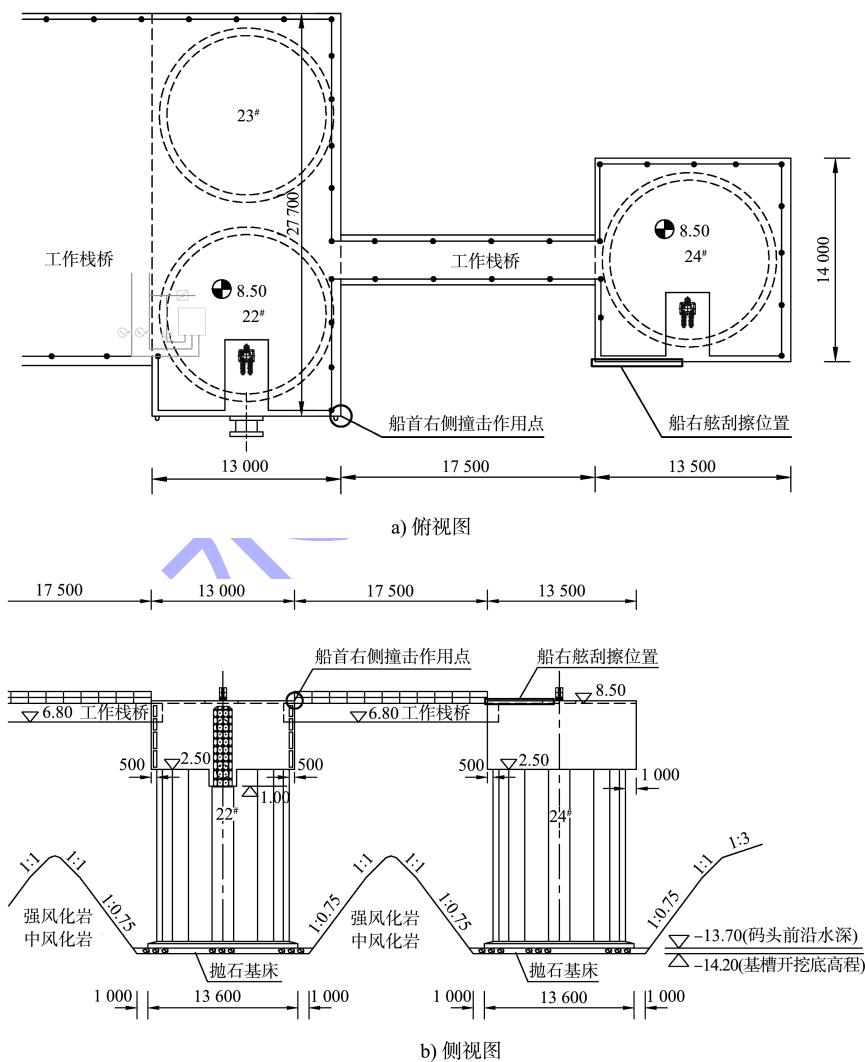


图1 船舶碰撞码头的受损区域 (尺寸: mm, 高程: m)

船舶撞击码头事故发生后, 为了尽快恢复生产, 评估灾害损失和事故索赔, 快速进行码头水工结构安全性检测与评估十分关键。由广西交科集团

有限公司负责对受碰撞码头结构进行检测评估, 通过检测查明码头结构的受损情况, 评估判定此次船舶撞击对码头结构安全性和适用性的影响。

## 2 码头结构检测

根据《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》<sup>[6]</sup>第 3.0.4.2 条, 偶发事故影响导致建筑物局部受损时, 应对水运工程水工建筑物进行安全性和适用性评估。针对本次船舶撞击码头事故具体情况, 制定针对性的检测评估方案, 通过对码头结构的变形与变位测量、结构外观检测(水上结构外观检查、水下结构外观检查)确定结构变形及受损状况; 后期综合检测结果结合船舶撞击下的码头结构稳定性分析计算, 评定此次船舶撞击对码头结构安全性和适用性的影响。

### 2.1 结构变形与变位检测

经测量, 码头前沿线与设计值比较偏移量实测值范围为-1~177 mm, 码头顶面高程与设计值比较偏差实测值范围为-44~-7 mm, 与 1 年前交工验收报告中前沿线位置实测偏差值(7~178 mm)和顶面高程实测偏差值(-46~-9 mm)相比, 未见明显异常变化。其中本次船舶碰撞的码头 22<sup>#</sup>、24<sup>#</sup>圆筒所属的墩台顶面高程与设计值比较偏差实测值范围为-20~-7 mm, 与 1 年前交工验收报告中实测偏差值(-17~-9 mm)相比, 未见明显异常变化。结构变形与变位检测结果表明, 未见受碰撞码头结构存在明显的不均匀沉降、变形和变位现象。

### 2.2 结构外观检测

#### 2.2.1 水上结构外观检查

采用目测和拍照的方法检测靠船墩上部结构存在的表面缺陷, 发现 22<sup>#</sup>圆筒墩台顶面东南角存在 1 处护轮坎顶角混凝土破损(图 2), 破损范围长、宽分别为 0.6、0.3 m, 墩台胸墙未见船舶刮擦破损; 24<sup>#</sup>圆筒墩台顶面西南角存在 1 处护轮坎顶角混凝土破损, 墩台南侧护轮坎前沿存在长度约 6 m 船舶刮擦痕迹, 墩台胸墙未见船舶刮擦破损。



图 2 护轮坎遭撞击破损

#### 2.2.2 水下结构外观检查

采用潜水摄像、水下探摸和测量的方法检查下部结构外观存在的缺陷病害, 检测发现码头 22<sup>#</sup>~24<sup>#</sup>圆筒外观均有微生物附着, 未发现结构存在破损、开裂等病害; 圆筒与基床结合处未见滑移、错动现象; 圆筒顶面与卸荷板结合处未见滑移、错位现象。

### 3 失控船舶撞击力的推算

船舶的撞击力推算关系到码头结构稳定性计算结果的准确性。确定船舶撞击力的方法主要有半经验公式估算法、动态有限元模拟数值计算法和试验法, 这 3 种方法均在实际工程中得到有效应用。外国常用的船舶撞击力计算公式有修正的 Woisin 公式、美国国家公路与运输协会 AASHTO 规范公式等, 其中 Woisin 公式所依据的试验资料来自于 4 万 t 以上的散货船高速与刚性墙壁的碰撞试验, 碰撞速度为 16 kn(约合 8.0 m/s); AASHTO 规范公式在船舶正撞刚性墙的基础上提出, 适用于油轮、货轮、散货船等船舶的船头正撞桥墩的情况, 上述公式均不适用于本次分析。国内的船舶撞击公式主要依据《港口工程荷载规范》<sup>[7]</sup>船舶靠泊时撞上码头的有效撞击能公式、《公路桥涵设计通用规范》<sup>[8]</sup>漂流物撞击力公式和铁路桥涵设计基本规范》<sup>[9]</sup>墩台承受船只或排筏的撞击力公式。本次撞击时使用的参数为: 船首右侧碰撞 22<sup>#</sup>圆筒墩台东南角护轮坎顶面时的碰撞速度约 0.20 m/s, 船舶总质量约 5 000 t。

#### 3.1 《港口工程荷载规范》计算公式

根据《港口工程荷载规范》, 船舶碰撞码头时产生的有效撞击能量计算公式为:

$$E_0 = \rho m v_n^2 / 2 \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为船舶靠岸时的有效撞击能量 (kJ);  $\rho$  为有效动能系数, 取 0.8;  $m$  为船舶质量 (t), 取 5 000 t;  $v_n$  为船舶靠岸法向速度 (m/s), 取 0.20 m/s。根据式(1)计算得  $E_0 = 80.0$  kJ。

根据《港口工程荷载规范》与 HG/T 2866—2003《橡胶护舷》<sup>[10]</sup>, 船舶的撞击力按照有效撞击能量通过性能曲线进行换算, 结果为 400 kN。

### 3.2 《公路桥涵设计通用规范》计算公式

根据《公路桥涵设计通用规范》4.4 节的相关规定, 漂流物横桥向撞击力标准值计算公式为:

$$F = \frac{Wv}{gT} \quad (2)$$

式中:  $W$  为漂流物重力 (MN), 根据河流中漂流物情况按实际调查确定, 取 49.050 MN;  $v$  为水流速度 (m/s), 取 0.2 m/s;  $T$  为撞击时间 (s), 通过参考文献 [1] 取 1.86 s。根据式(2)计算得  $F=538$  kN。

### 3.3 《铁路桥涵设计基本规范》计算公式

根据《铁路桥涵设计基本规范》4.4.6 节的相关规定, 墩台承受船只或排筏的撞击力计算公式为:

$$F = \gamma v \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{C_1 + C_2}} \quad (3)$$

式中:  $F$  为撞击力 (kN);  $\gamma$  为动能折减系数 ( $s/m^{1/2}$ ), 当船只或排筏斜向撞击墩台(指船只或排筏驶近方向与撞击点处墩台面法线方向不一致)时可采用 0.2, 正向撞击(指船只或排筏驶近方向与撞击点处墩台面法线方向一致)时可采用 0.3, 考虑设置吸能防护措施时, 应适当折减, 折减值应通过

试验研究;  $v$  为船只或排筏撞击墩台时的速度 (m/s), 此项速度对于船只采用航运部门提供的数据, 对于排筏可采用运期的水流速度, 取0.2 m/s;  $\alpha$  为船只或排筏行驶方向与墩台撞击点处切线所成的夹角, 应根据具体情况确定, 如有困难, 可取  $20^\circ$ ;  $W$  为船只或排筏的重力(MN), 取 49.050 MN;  $C_1$ 、 $C_2$  为船只或排筏的弹性变形系数、墩台圬工的弹性变形系数(m/kN), 缺乏资料时可假定  $C_1+C_2=0.0005$  m/kN。根据式(3)计算得  $F=135.5$  kN。

3 个规范推算的撞击力结果取大值, 为 538 kN。根据该码头的设计资料: 码头设计荷载中的工作平台及系缆墩撞击力为 936 kN。本次船舶碰撞码头的撞击力小于码头设计撞击力, 初步判断本次船舶碰撞不影响靠船墩整体稳定。

#### 4 受碰撞靠船墩安全性和适用性评估

## 4.1 安全性评估

根据图纸资料及码头实际状况,对船舶撞击下的22#圆筒墩台稳定性进行计算分析,码头结构见图3。

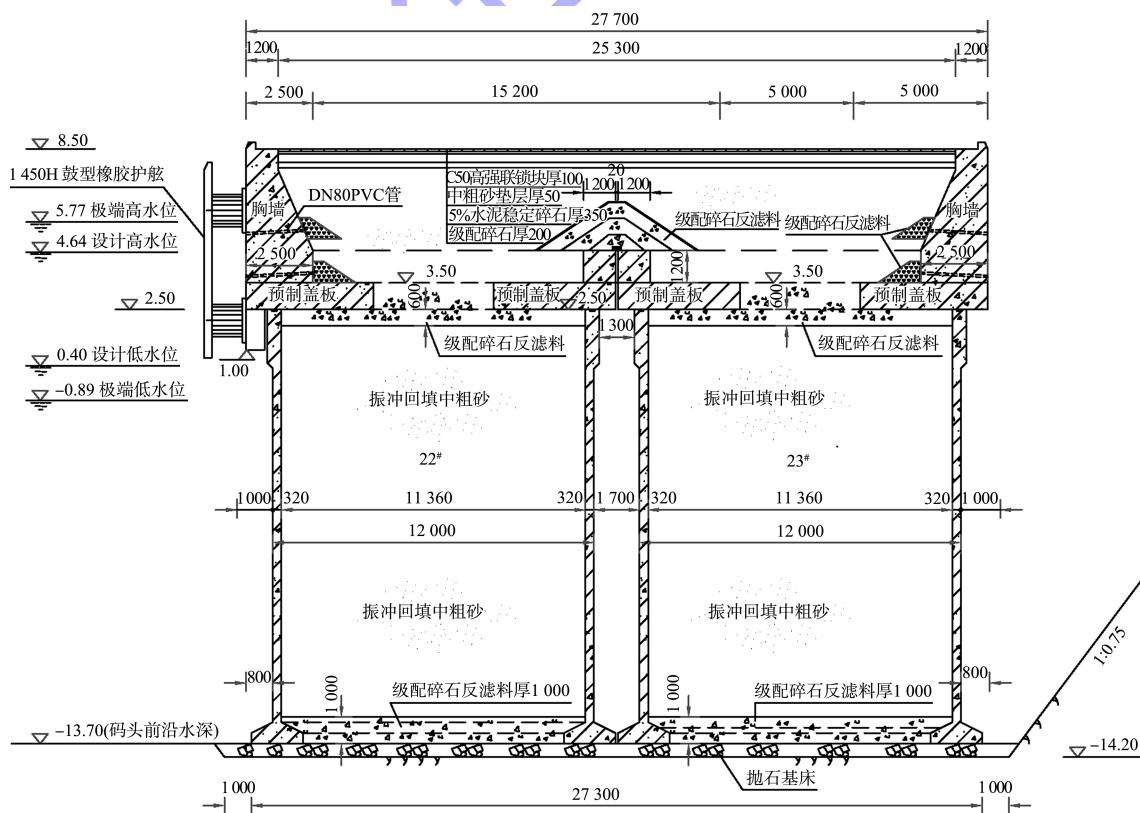


图 3 22#与23#圆筒墩台结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

将原并排布置的 22#、23#圆筒结构简化为 22#单圆筒墩台结构, 不考虑 23#圆筒墩台结构和 22#圆筒墩台西侧工作栈桥对 22#圆筒墩台的支撑作用。对码头 22#圆筒墩台结构的稳定性进行验算复核, 验算码头靠船墩遭遇船舶碰撞后的安全性等级, 船舶撞击力取 538 kN, 验算主要内容为: 结构自身重力+船舶撞击力下的结构稳定性。

按照《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》第 7.2 条的相关要求, 对码头 22#圆筒墩台

结构的稳定性进行验算复核, 验算码头靠船墩遭遇撞击后的安全性等级, 取最低一级作为该评估单元的安全性评估等级, 见表 1, 其中  $R_d$ 、 $S_d$  分别为结构抗力、作用效应组合设计值;  $\gamma_0$  为结构重要性系数, 结构安全等级为一级时取 1.1, 二级时取 1.0, 三级时除整体稳定性验算取 1.0 外, 其他验算项目均取 0.9; 整体稳定性评定为 B 级时的结构应及时采取措施。复核验算结果见表 2。

表 1 重力式码头安全性评估分级标准

性能	A	B	C	D	
抗倾稳定性					
抗滑稳定性	$R_d/(\gamma_0 S_d) \geq 1.00$	$0.95 \leq R_d/(\gamma_0 S_d) < 1.00$	$0.90 \leq R_d/(\gamma_0 S_d) < 0.95$	$R_d/(\gamma_0 S_d) < 0.90$	
整体稳定性					
基床和地基承载力					
结构构件的承载力	卸荷板、沉箱、扶壁、空心方块、圆筒、梁板	$R_d/(\gamma_0 S_d) \geq 1.00$	$0.90 \leq R_d/(\gamma_0 S_d) < 1.00$	$0.90 \leq R_d/(\gamma_0 S_d) < 0.95$	$R_d/(\gamma_0 S_d) < 0.90$
天然地基的轨道梁、胸墙、胸墙垫板、胸墙块体		$R_d/(\gamma_0 S_d) \geq 1.00$	$0.90 \leq R_d/(\gamma_0 S_d) < 1.00$	$0.85 \leq R_d/(\gamma_0 S_d) < 0.90$	$R_d/(\gamma_0 S_d) < 0.85$

表 2 抗滑、抗倾稳定性验算结果

计算面	抗滑力/ (kN·m <sup>-1</sup> )	滑动力/ (kN·m <sup>-1</sup> )	稳定性力矩/ (kN·m)	倾覆力矩/ (kN·m)	是否满足规范要求
卸荷板底面	231.80	45.06	1 051.34	270.39	是
圆筒底面	1287.76	45.06	10 980.06	1 000.46	是

注: 本码头为现浇胸墙, 不考虑胸墙抗滑稳定性。

根据《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》第 3.0.5 条, 结合验算结果, 本水工建筑安全性符合国家有关标准要求, 具有足够的承载能力, 船舶碰撞不影响被碰撞的靠船墩水工建筑物结构整体稳定, 现状结构稳定性满足规范要求, 结构安全性评估等级为 A 级。

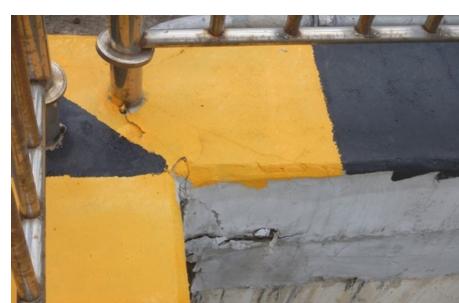
#### 4.2 适用性评估

通过对码头现场实地踏勘, 发现 22#、24#圆筒墩台顶面护轮坎各存在 1 处小面积混凝土破损, 24#圆筒墩台南侧护轮坎前沿存在长度约 6 m 的船舶刮擦痕迹; 码头墩台胸墙未见船舶刮擦破损现象; 码头圆筒与基床结合处未见滑移、错动; 圆筒顶面与卸荷板结合处未见滑移和错位。通过对

靠船墩台与人行桥连接处和 22#与 23#圆筒墩台连接处进行检查, 未发现结构存在明显错位和新的开裂现象, 见图 4。



a) 24#圆筒墩台与人行桥连接处(陆侧)



b) 24#圆筒墩台与人行桥连接处(海侧)



c) 22#圆筒墩台与人行桥连接处(陆侧)



d) 22#与23#圆筒墩台连接处上部(东侧)



e) 22#与23#圆筒墩台连接处(东侧)



f) 24#圆筒墩台与人行桥连接处

图4 圆筒墩台与人行桥连接处外观状况

根据《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》第3.0.5条, 结合靠船墩外观检查结果, 遭遇

船舶碰撞的码头靠船墩水工建筑物整体完好, 未见明显的变形、位移现象, 现状结构整体稳定, 局部表观破损不影响正常使用, 宜加强监测, 结构适用性评估等级为B级。

综合检测结果及受碰撞靠船墩稳定性验算结果, 被碰撞的码头靠船墩结构安全性评估等级为A级, 结构适用性评估等级为B级。

## 5 受损部位修复处理及后续运营期监测

对船舶刮擦存在破损的码头护轮坎, 可按照JTS 311—2011《港口水工建筑物修补加固技术规范》<sup>[11]</sup>第4.3.3条和附录B.3的要求进行修补。对破损的部位, 可采用聚合物水泥砂浆进行断面修补, 也可以采用立模浇筑混凝土法进行断面修补。

采用聚合物水泥砂浆进行断面修补时, 具体措施为: 1) 凿除破损部位松散混凝土至露出完整坚硬部分, 用压力不小于20 MPa的高压淡水清除混凝土表面浮灰、松散物和其他不牢附着物; 2) 采用混凝土界面黏结材料, 施涂于待修补的混凝土表面; 3) 采用聚合物水泥砂浆, 在界面材料未固化前一次或分次刮抹于混凝土表面, 至恢复缺损处断面或达到规定的保护层厚度, 并抹平修整; 4) 根据聚合物水泥砂浆的性能要求, 按照规定的方式和时间进行养护, 养护完成后, 对修补的护轮坎部位涂刷黄黑相间的警示条纹, 与原结构保持一致。

为保证码头后期运营安全, 建议对码头主体结构沉降位移定期监测和检测, 定期监测周期1年1次为宜, 定期检测周期3年1次为宜, 同时加强日常巡查维护。

## 6 结语

1) 采用码头结构现场检测与规范计算相结合的方法, 综合评估遭受船舶撞击的码头水工建筑物的安全性和适用性是行之有效的, 可为事故快速鉴定、受损结构修复和结构后期运营提供科学依据和技术支撑。码头经过一年多的运营, 通过巡查、监测, 码头结构未见异常。 (下转第54页)