



# 闸墙碰撞分析及其混凝土性能指标研究\*

陈 达<sup>1</sup>, 谢春秋<sup>1,2</sup>, 廖迎娣<sup>1</sup>, 侯利军<sup>1</sup>

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 连云港建港指挥部, 江苏 连云港 222042)

**摘要:** 针对Ⅲ级船闸, 采用有限元方法分析闸室墙面遭受设计最大吨级船舶以最大碰撞角度和规范规定的最大航速碰撞闸墙时的内部应力分布情况, 发现闸室混凝土结构采用常规的C25强度等级不足以保证闸墙表面承受碰撞时引起的压应力和拉应力。同时, 依据有限元分析结果得到闸墙混凝土需要满足的各项强度指标, 并且通过实际工程的现场试验研究验证了新老混凝土粘结强度指标的可靠性, 为船闸工程设计和结构修复提供可靠依据。

**关键词:** 闸墙; 船舶; 碰撞分析; 性能指标

中图分类号: U 661.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)05-0120-04

## Collision impact on lock wall and property indices of concrete used in lock wall

CHEN Da<sup>1</sup>, XIE Chun-qiu<sup>1,2</sup>, LIAO Ying-di<sup>1</sup>, HOU Li-jun<sup>1</sup>

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. The Command Post of Lianyungang Harbor Construction, Lianyungang 222042, China)

**Abstract:** The paper presents the finite element analysis on the stress distribution in lock wall subjected to an impact of ship with the maximum weight, impact angle and velocity. The results reveals that the C25 concrete traditionally used in lock wall can't carry the tensile and compressive stress at collision. Based on the FEM analysis results, various strength indices of concrete in lock wall are correspondingly suggested. The field tests in actual engineering further verify the reliability of bond strength index between new and old concrete. These proposed indices provide reliable reference for the design and repair of ship lock structure.

**Key words:** lock wall; ship; impact analysis; property indices

内河航运作为一种传统的运输方式, 具有运费低、能耗小、运量大等优势。近年来, 区域经济配置发展, 地区间的物流量逐年增大, 在有着丰富水网资源的地区, 这种优良的运输方式得到了较快的发展。仅在江苏省内就有内河航道24 800 km, 航道总里程占全国的1/4。其中, 等级航道7 578 km, 设有通航船闸百余座, 属于交通部门管理的有近60座。

随着水运事业的发展, 船舶运量和船型逐渐加大, 船舶实际通过量逐年增加, 致使船闸运行频率逐年增加。与此同时, 船闸水工建筑物的耐

久性等也受到严峻的考验。船舶在进出闸室及在闸室内等待过闸期间, 由于驾驶操作原因或者一些不可避免的因素对闸首和闸室墙产生碰擦, 使得闸墙表面受损严重。此外, 混凝土剥落造成墙面露筋、底板及廊道受水流冲蚀造成露石、大面积的混凝土表面碳化等, 都已严重影响船闸水工建筑物的安全和使用寿命<sup>[1-2]</sup>。然而, 闸墙表层混凝土遭受船舶碰撞的破坏机理复杂, 故对闸墙混凝土材料及修复材料的性能指标有较高要求, 不仅要具有足够的抗压强度, 还要满足抗拉强度等要求。

收稿日期: 2012-10-16

\*基金项目: 江苏省交通科学研究计划项目(2010Y21-1); 水利部科技推广计划项目(TG1137)

作者简介: 陈达(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水运工程结构腐蚀防护与修复技术。

根据《江苏省干线航道网规划》，江苏省将在2020年前建成以长江、京杭运河为主轴，以通行1 000吨级船舶的Ⅲ级及以上航道为主体，形成由“两纵四横”3 455 km高等级航道组成的干线航道网。基于此，本文以江苏省干线航道网上的主要船闸类型（Ⅲ级船闸）为例，在系列文章《过闸船舶碰撞力研究》<sup>[3]</sup>建立的碰撞力公式基础上，进一步对闸墙遭受船舶碰撞的应力状况进行分析，根据计算得到的应力确定闸墙混凝土材料和修复材料的性能指标，为船闸结构设计和修复提供依据。

## 1 闸墙碰撞分析

### 1.1 船舶撞击力

船舶与闸墙间的碰撞是一个动态冲击过程，在此过程中闸墙受到船舶的冲击作用，即撞击力。由于闸室宽度有限，船舶不会垂直碰撞于闸墙，而是以一定角度发生碰撞。各种船型的形状不是完全标准，假定船舶的平面尺寸为矩形（图1），依据闸室宽度和船舶长度，可以通过式（1）确定船舶与闸墙间的最大理论碰撞角度

$$L_{OA}\sin\alpha + L_{OB}\cos\alpha = L \quad (1)$$

式中： $L_{OA}$ 为船舶长度， $L_{OB}$ 为船舶宽度， $L$ 为船闸宽度，单位为m。对于Ⅲ级内河航道和船闸，其船舶最大载质量为1 000 t。根据《京杭运河运输船舶标准船型主尺度系列》<sup>[4]</sup>建议的船型尺度，对于1 000 t以下的几种常用船型，可以通过式（1）计算得各船型相应的最大理论碰撞角度。计算结果见表1。相应地，船舶运行速度可以分解为垂直于闸墙表面和平行于闸墙表面的两个分量，而撞击力仅与垂向分速度相关。在碰撞过程中，船舶一般还将发生相对于闸墙的水平滑动，故闸墙表面也同时受到水平的滑动摩擦力作用。

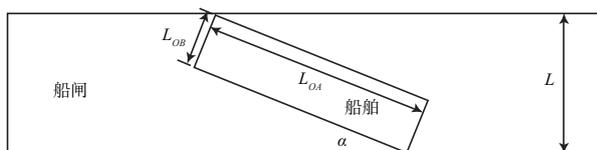


图1 船舶碰撞角度计算示意图

对于船舶与闸墙之间的碰撞力 $F$ ，系列文章《过闸船舶撞击力研究》<sup>[3]</sup>通过现场试验测定600 t

表1 各船型在闸室内与闸墙碰撞的可能最大角度

载货吨级/ t	$L_{OA}$ 最小值/ m	$L_{OB}$ 最小值/ m	最大理论撞击角值/ (°)
300	36	7.1	27.837
500	45	8.2	19.861
800	52	8.8	15.091
1 000	56	9.8	13.938

船舶用废旧轮胎作为护弦时碰撞闸墙的撞击力，实测撞击力要远大于依照《船闸水工建筑物设计规范》<sup>[5]</sup>的计算值，依据实测数据回归得到最大撞击力经验公式

$$F_{600} = 4\,790.8v + 106.36 \quad (2)$$

式中： $F_{600}$ 为600 t船舶对闸墙的撞击力； $v$ 为垂直于闸墙的分速度。但是，对于Ⅲ级船闸，其船舶最大载重为1 000 t，故不能直接应用此公式。一般认为，船舶碰撞闸墙产生的撞击力与船舶的质量成正比，因此，可以将式（2）中的撞击力乘以因子 $m/600$ 来考虑不同质量船舶对闸墙的撞击力，则得

$$F = \frac{m}{600}(4790.8v + 106.36) \quad (3)$$

式中： $m$ 为船舶满载时的排水量。JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》<sup>[6]</sup>规定机动单船进出闸的允许速度分别为0.8 m/s和1.0 m/s。本文针对Ⅲ级船闸，对最大设计吨级船舶（1 000 t船舶）以规范规定最大航行速度1.0 m/s在有护弦情况下撞击闸墙的情况进行分析。对于1 000 t船舶，其满载排水量和最大碰撞角度分别为1 480 t和13.938°，故据式（2）可得航行速度为1.0 m/s时船舶对闸墙的最大撞击力为3 109 kN。

### 1.2 闸墙碰撞有限元分析

本文采用有限元软件Ansys进行闸墙碰撞受力分析，研究对象为撞击主要影响区3 m × 3 m × 1 m（长 × 宽 × 厚）的混凝土块体，混凝土采用SOLID45单元，混凝土模型采用Ansys自带的DP模型。混凝土块体背面为固定支撑，其它位置均为自由面；在已选的混凝土块体中心一定面积上以静载方式施加撞击力与滑动摩擦力，以此研究碰撞过程中混凝土墙体的内力最大值，并与混凝土强度指标做对比，分析墙面破坏的机理。现场试验表

明, 在使用废旧轮胎为护舷情况下, 船舶碰撞时墙面的受力面积平均为 $0.088 \text{ m}^2$ 。摩擦力的大小为 $3109 \times 0.7$ (摩擦系数) $=2176.3 \text{ kN}$ , 方向向右。

### 1.2.1 拉压应力分析

图2为计算得到的混凝土块体内最小主应力分布图, 负值代表压应力, 正值代表拉应力。从图中可以看出, 压应力最大值发生在外力作用区域, 越远离中心区域, 压应力值越小; 压应力呈 $x$ 轴对称分布, 由于施加水平摩擦力, 相同中距下右侧压应力要大于左侧, 且最大值为 $29.6 \text{ MPa}$ 。

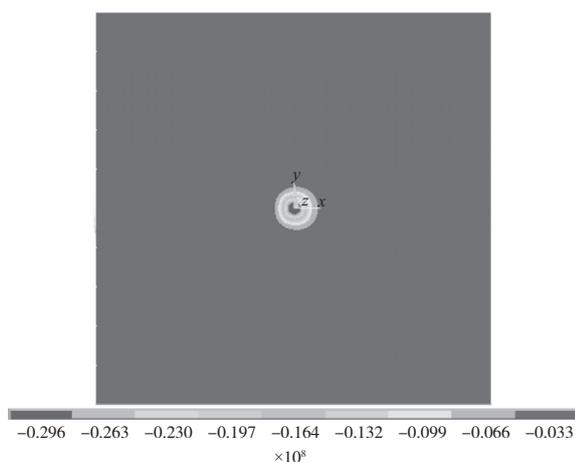


图2 混凝土块内部最小主应力分布

图3为混凝土块体内最大主应力分布图。由图可知, 混凝土块体内部大部分区域受压应力控制, 拉应力主要分布于作用力左侧区域, 而其最大值在作用力右侧, 指向摩擦力作用方向; 拉应力同样也关于 $x$ 轴对称分布, 最大值为 $2.68 \text{ MPa}$ 。

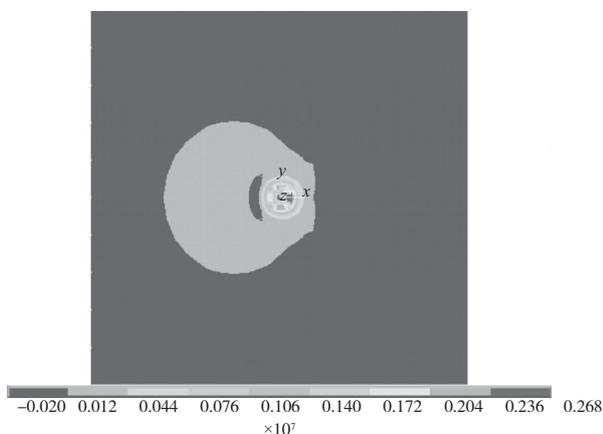


图3 混凝土块内部最大主应力分布

由此可知, 在有护舷情况下, 当 $1\ 000 \text{ t}$ 船舶以最大可能碰撞角度 ( $13.938^\circ$ ) 和最大航行速度

( $1.0 \text{ m/s}$ ) 撞击闸墙时, 闸墙表层混凝土内的最大受压和受拉强度分别为 $29.6 \text{ MPa}$ 和 $2.68 \text{ MPa}$ 。近年来新建船闸的混凝土强度等级一般不超过C25, 其抗压、抗拉强度标准值分别为 $25 \text{ MPa}$ ,  $1.78 \text{ MPa}$ , 均小于正常船闸运行时可能出现的碰撞强度。此外, 在实际运行中, 有些船舶的进出闸速度可能超过 $1.0 \text{ m/s}$ , 甚至达到 $1.5 \text{ m/s}$ , 则对闸墙表面产生更大的撞击应力, 从而极大地加剧了碰撞损伤。在船闸运行一定时期后, 由于闸墙受到船舶碰撞而引起表层混凝土应力超过了材料的自身强度, 从而闸墙表面混凝土随之出现开裂、破碎和剥落, 对闸墙造成损害, 严重影响了船闸结构的耐久性。

### 1.2.2 新老混凝土结合面拉应力分析

在实际闸墙修复施工中, 修复砂浆的厚度一般控制在 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 。因此, 该深度范围内的最大主应力分布可作为评价新旧混凝土粘结面强度的依据。图4为新旧混凝土粘结面最大主应力分布图。从图中可以看出, 粘结面上大部分区域受压应力控制; 粘结面的拉应力主要分布在外力作用区域, 且此区域中心位置的拉应力最大, 为 $1.63 \text{ MPa}$ 。

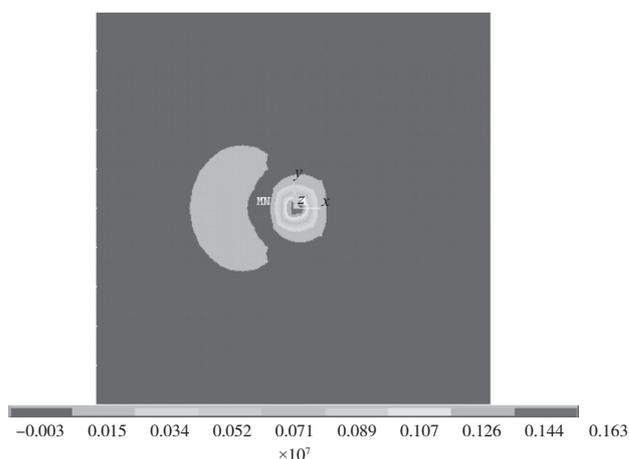


图4 新旧混凝土粘结面最大主应力分布

### 1.2.3 闸墙表层混凝土强度指标

当前, 在船闸管理规定的约束下, 船舶进出闸过程中均采用废旧轮胎作为护舷, 对船舶与闸墙之间的碰撞予以缓冲, 仅在极少数意外情况下才可能发生无护舷的碰撞。因此, 以有护舷情况确定闸墙表层混凝土性能指标。前文以 $1\ 000 \text{ t}$ 船舶

在最大可能碰撞角度(13.938°)和规范规定的最大航行速度(1.0 m/s)碰撞闸室作为研究工况,分析了闸墙遭受碰撞后的应力状况,从而可以得到满足规范要求的闸墙表层混凝土及修复材料的性能指标。综合前文分析可知,在有护舷情况下,闸墙表层混凝土的抗压强度应大于29.6 MPa,抗拉强度应大于2.68 MPa,而且新旧混凝土界面的粘结强度应大于1.63 MPa。

## 2 闸墙修复工程实例及现场试验验证

近年来,船闸结构由于闸墙面层损坏、钢筋外露等耐久性问题而进行的修复工程越来越多。在1999年,采用硅粉砂浆和高强砂浆对江苏某船闸闸室墙面进行大面积修复,修复面积约为2 000 m<sup>2</sup>。

表2 硅粉砂浆和高强砂浆修复闸墙后面层的现场拉拔试验结果

磨耗层砂浆	实测抗拉强度/MPa			平均值/MPa	破坏形式
2 <sup>#</sup> 硅粉砂浆A段	2.3	1.1	2.8	2.07	1个结合面断
2 <sup>#</sup> 硅粉砂浆B段	2.4	2.5	2.4	2.43	均为老混凝土断
2 <sup>#</sup> 硅粉砂浆C段	0.6	0.9	1.6	1.03	均为老混凝土断
2 <sup>#</sup> 硅粉砂浆D段	2.0	3.4	2.5	2.63	1个新胶断、2个结合面断
高强砂浆N段	1.5	2.4	2.9	2.27	1个砂浆断

从表2可看出,由于建闸时间较长,老闸墙混凝土有所下降,其抗拉强度最大值2.5 MPa,最小值0.6 MPa,相差较大。其次,很多试样均表现为老混凝土破坏,也就是说砂浆与老混凝土的界面粘结强度超过老混凝土的抗拉强度,最大值为3.4 MPa,最小值为2.0 MPa。对比表2中抗拉强度的平均值,除了老混凝土自身发生拉断情况外,其余情况的抗拉强度平均值均大于前文所得到的新老混凝土界面粘结强度指标1.63 MPa。也就是说,若满足修复材料粘结强度性能指标,则不会发生修复层脱落的破坏,保证闸墙结构的耐久性和正常运行。基于此,这一工程实例进一步验证了所提出的新旧混凝土粘结强度指标的可靠性。

## 3 结论

1) 通过有限元方法分析了Ⅲ级船闸闸室墙遭受船舶碰撞的应力分布,结果表明1 000 t船舶以最大碰撞角度和规范规定的最大航行速度碰撞闸墙的最大压应力为29.6 MPa、最大拉应力为2.68 MPa,大于闸室结构中常规采用的C25混凝土强度指标,

在修复后经过近十年的运行中,闸墙外表只有轻微擦痕,没有出现严重面层脱落问题,达到了良好的效果。

本文采用2007年实测的修复后闸墙面层的现场拉拔试验资料,以运行多年后新旧混凝土的粘结强度评价本文所提出的新老混凝土粘结强度指标的可靠性。需要指出,本船闸采用的修复材料的抗压强度高达60 MPa以上,远远满足发生碰撞时的抗压强度要求。现场试验中,闸墙共检测5个断面15个数据,其中硅粉砂浆4个断面12个数据、高强砂浆1个断面3个数据。15个数据中,由于老闸墙强度较低,在老混凝土内破坏的有10个,在新老砂浆结合面处破坏的有3个,由于胶粘接不牢断裂的1个,新砂浆破坏的1个,试验结果如表2所示。

从而导致闸墙在碰撞过程中出现破损等现象。

2) 得到闸墙混凝土能够经受船舶碰撞的性能指标分别为:抗压强度29.6 MPa、抗拉强度2.68 MPa以及新老混凝土之间的粘结强度1.63 MPa。

3) 以江苏某船闸闸墙修复结构在运行8 a后的现场拉拔试验资料,验证了建议的新老混凝土粘结强度指标的可靠性。

## 参考文献:

- [1] 汪国勤. 船闸闸首闸室墙面损坏修理技术[J]. 水运工程. 1993(1): 34-36.
- [2] 郑昌利. 硅粉水泥砂浆与船闸闸墙修复的研究[J]. 水运科技信息, 1994(21): 7-9.
- [3] 陈晓峰, 陈达, 廖迎娣. 过闸船舶撞击力研究[J]. 水运工程, 2010(9): 48-50.
- [4] 交通运输部水运司. 京杭运河运输船舶标准船型主尺度系列[R]. 北京: 交通运输部水运司, 2006.
- [5] JTJ 307—2001 船闸水工建筑物设计规范[S].
- [6] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范[S].