

# Dynamic Response of Piled Wharf Being Impacted by Uncontrolled Ship

Haoran Shi, Haichao Gao, Zhiyuan Cong, Ying Wang\*

School of Civil Engineering, SEU, Nanjing Jiangsu  
Email: 13578542692@163.com, \*civil\_wangying@seu.edu.cn

Received: Jun. 9<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jul. 3<sup>rd</sup>, 2020; published: Jul. 10<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Taking the 5000 t bulk carrier impacting vertically to a piled wharf structure at a speed of 0.5 m/s under the state of out of control as an example, an explicit dynamic analysis software LS-DYNA was used to establish the dynamic simulation model of the collision process, and the dynamic response of the piled wharf under the impact of the runaway ship was studied. Through the detailed analysis of the impact force, displacement and distribution direction, equivalent stress and acceleration of the wharf, the weak position of the wharf and the motion law after the impact are obtained, which provides a theoretical basis for the design, maintenance and reconstruction of similar wharfs. The results show that the piled wharf will have obvious torsion and vibration after being impacted. The stress is concentrated in the impact position and the inclined piles with large inclination degree in the nearby frame bent and the connecting place between the piled wharf and the superstructure. When the ship collision occurs, the quality detection should be focused on these positions.

## Keywords

Piled Wharf, Numerical Simulation, Uncontrolled Ship's Impact, LS-DYNA

---

# 船舶失控撞击高桩码头的动力响应研究

时浩然, 高海超, 丛智远, 王莹\*

东南大学土木工程学院, 江苏 南京  
Email: 13578542692@163.com, \*civil\_wangying@seu.edu.cn

收稿日期: 2020年6月9日; 录用日期: 2020年7月3日; 发布日期: 2020年7月10日

---

## 摘要

本文以5千吨级散货船在失控状态下以0.5 m/s的速度垂直撞击某高桩码头结构为例, 利用显式动力学分析

---

\*通讯作者。

软件LS-DYNA建立该撞击过程的动力仿真模型,对失控船舶撞击作用下的高桩码头进行动力响应研究。通过对仿真计算结果进行撞击力时程分析、位移时程分析、等效应力分析以及加速度时程分析,得到码头受到撞击后的运动规律和受力薄弱位置,为同类码头的设计、维护及改造提供理论依据。研究得出码头在受到撞击后会出现较为明显的扭转和振动,撞击过程中应力集中分布于撞击位置、附近排架中桩斜度较大的斜桩以及桩与上部结构的连接处,当船撞事故发生后,应重点对这些位置进行质量检测。

## 关键词

高桩码头,数值仿真,船舶失控撞击,LS-DYNA

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

码头是供船舶停靠的水工建筑物,是港口的重要组成部分。随着我国经济快速稳定发展,河道航运条件不断改善,船舶逐渐趋于大型化,同时一些较早建成的码头存在一定的老化问题,这对于码头的长久安全服役有着巨大挑战。在船舶停靠码头的时候不可避免的会产生撞击力作用在码头结构上,从而产生动力学响应,当产生的响应超过了码头的当前安全承载力,可能会发生不可预估的事故损失。对服役多年的码头进行安全评估是十分必要的,但仅仅将船舶撞击码头的过程看作是一个静力作用过程[1],是不能完全保证结构的安全。目前高桩码头结构分析方法主要分为平面计算方法、空间计算方法和物理模型试验方法,考虑到码头的实际情况,本文根据相关规范中的参数建立详细合理的船舶和码头的三维模型[2],通过模拟船撞事故来对码头进行动力学分析,对现有码头结构的安全评估以及后续高桩码头结构的设计都有一定的指导价值。本文采用软件LS-DYNA对船舶碰撞码头的动态过程进行有限元模拟,LS-DYNA主要采用拉格朗日算法,在结构撞击模拟中被广泛应用,十分适合用来分析船舶碰撞码头的响应状况[3]。

## 2. 有限元计算模型的建立

### 2.1. 高桩码头结构模型

本文以镇江某高桩码头为研究对象建立有限元模型进行数值分析,码头的上部结构主要包括平台面板、横梁、纵梁、前边梁、系船梁及靠船构件,桩则包括直桩和斜桩。

由于码头受到船舶撞击后的动力响应受接岸结构等的影响相对较小,并且码头纵向长度长,各个结构分段间的相互约束较弱,选取一个结构分段作为独立空间受力体系进行分析[4]。为了简化计算,选取码头的四跨五樁结构作为计算分析对象。同时考虑到码头结构构件较多,模型只保留主要构件,包括桩、横梁、纵梁、系船梁、平台面板以及撞击位置处的靠船构件橡胶护舷,略去了撞击点以外的靠船构件与橡胶护舷。同时为了减小计算量,采取刚度等效原则对码头结构构件的截面简化,同时以等效弹性模量模拟钢筋作用。

码头结构和橡胶护舷选用SOLID164单元模拟,均设置为弹性材料“MAT\_ELASTIC”。码头结构材料参数:密度为 $2350 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 $30 \text{ GPa}$ ,泊松比为 $0.167$ 。橡胶护舷材料参数:密度为 $1150 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 $8 \text{ MPa}$ ,泊松比为 $0.36$ 。图1中红色部分为钢筋-混凝土结构,蓝色部分为撞击处的橡胶护舷。

模型整体采用六面体单元进行扫略网格划分[5]，动力计算共包括 149,917 个节点，87,162 个单元。建立的码头有限元模型见图 1。



Figure 1. Finite element model of wharf structure  
图 1. 码头结构有限元模型

船舶对码头上部结构的撞击是一个短暂的受力过程，受岸坡土体的影响相对较小。因此参照地基土的实际情况，根据 JTS 167-4-2012《港口工程基桩规范》[6]中的规定，计算得出码头桩基的受弯嵌固点深度为 4.2 m。将固结位移边界条件施加在嵌固点以下的桩基，以此来代替土体对码头桩基的约束作用。

## 2.2. 船舶模型

研究选取 5 千吨级散货船为设计船型，由于不考虑船体变形，对船舶进行了简化，未细致模拟全船结构。船舶选用 SHELL163 单元[7]，设置为弹性材料“MAT\_ELASTIC”，通过 Mass 质量点单元施加船体质量[8]。船舶材料参数：密度为  $7800 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量为 210 GPa，泊松比为 0.3。船舶的有限元模型见图 2，共包括 4599 个节点和 3170 个单元。

在船舶与码头的碰撞过程中，周围的水体对船舶的运动起到了一定的阻碍作用，水体吸收了撞击船舶的部分动能。因此为了表征船舶因水的阻力而减少的部分动能，本文采用附加质量法，以 0.03 倍的排水量作为附加质量[9]。

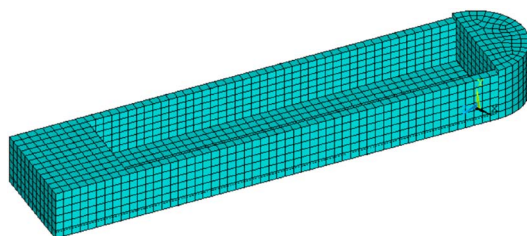
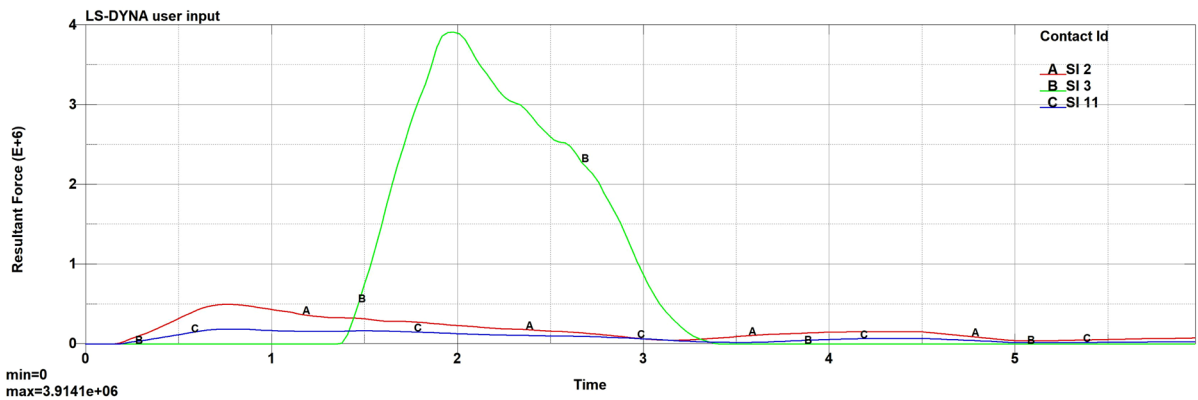


Figure 2. Finite element model of the ship  
图 2. 船舶有限元模型

## 3. 撞击仿真计算结果及其分析

### 3.1. 撞击力时程分析

失控船舶垂直撞击码头时，撞击区域在极短时间内会产生巨大的撞击力，造成被撞部位的损伤破坏，继而整个码头也会发生一定的变形和损伤。通过有限元计算得到的撞击力时程曲线见图 3。

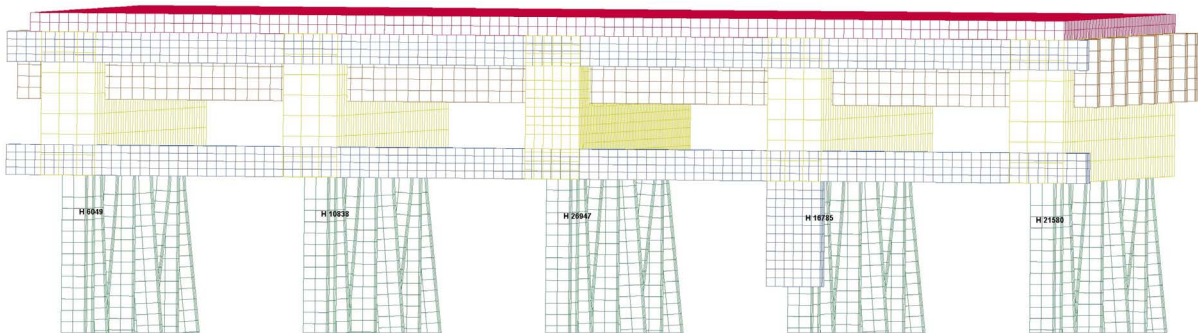


**Figure 3.** Time history curve of impact force (Unit: N)  
**图 3.** 撞击力时程曲线(单位: N)

图 3 中, 红色曲线 A 为船舶与橡胶护舷的接触力, 绿色曲线 B 为船舶与码头结构的接触力, 蓝色曲线 C 为橡胶护舷与码头结构的接触力。在 0.15 s 左右时船舶首先开始接触护舷, 撞击力不断增大, 受到橡胶护舷的吸能缓冲作用, 此时传递给码头结构的撞击力约为护舷受力的三分之一。随着船舶继续撞击, 在 1.32 s 左右时橡胶护舷失效, 船舶开始接触码头结构, 此时撞击力迅速增大, 达到峰值 3914.1 kN 后又迅速减小, 在 3.42 s 左右时撞击力降低为 0。碰撞过程持续时间约为 3.27 s, 撞击力曲线图形为抛物线形。

### 3.2. 码头结构位移时程分析

为分析码头在受到船舶撞击后, 从左侧至右侧的位移变化, 在码头前端设置 5 个追踪单元如图 4 所示, 从左至右依次为 A 至 E 点。A 点为追踪单元 6049, B 点为追踪单元 10,838, C 点为追踪单元 26,947, D 点为追踪单元 16,785, E 点为追踪单元 21,580。



**Figure 4.** Tracking elements of front end  
**图 4.** 码头前端追踪单元示意图

通过图 5(a)的横向位移时程曲线可以看出, 在船舶开始接触橡胶护舷时, 码头在横向上产生微小的位移。在橡胶护舷失效、码头开始受到撞击后, 位移大小明显增大, 同时伴随着显著的扭转, 从左至右追踪单元的横向位移逐渐增大。随后可以观察到码头在沿着船舶入射方向运动的同时, 发生了往复的扭转振动。由图 5(b)纵向位移时程曲线可以看出码头前端整体性较好, 在整个撞击过程中没有较大的位移差异。

为分析码头从前端至后端的位移变化, 在码头的右侧上部结构设置 9 个追踪单元如图 6 所示。从左至右依次为 A 至 H 点。A 点为追踪单元 54,080, B 点为追踪单元 52,388, C 点为追踪单元 50,696, D 点

为追踪单元 49,004, E 点为追踪单元 47,312, F 点为追踪单元 45,620, G 点为追踪单元 43,928, H 点为追踪单元 42,236。

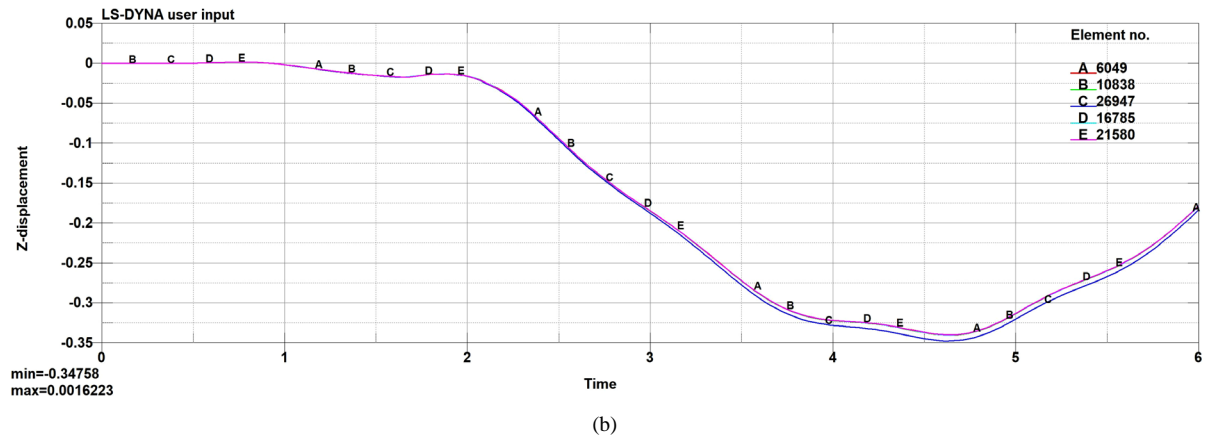
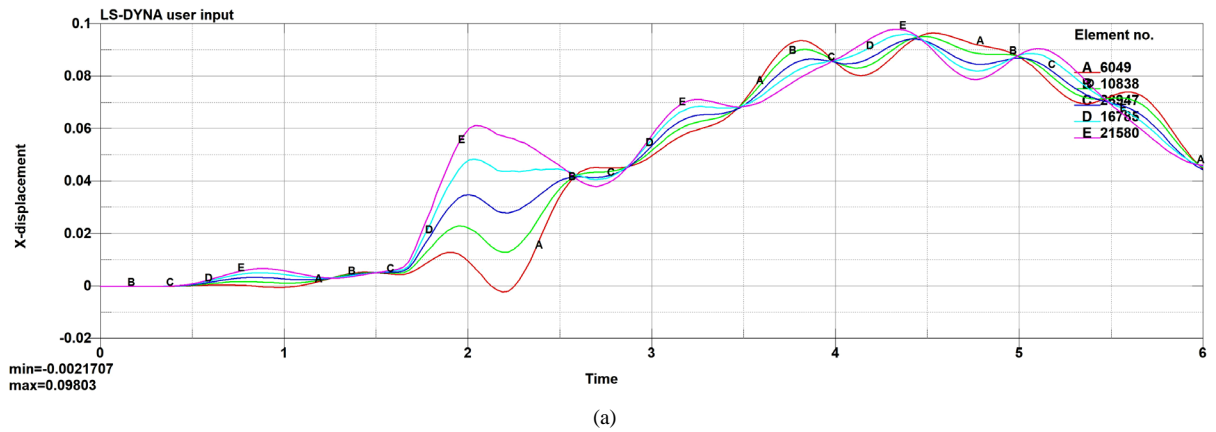


Figure 5. Displacement time history curve of front end (Unit: m)

图 5. 码头前端位移时程曲线(单位: m)

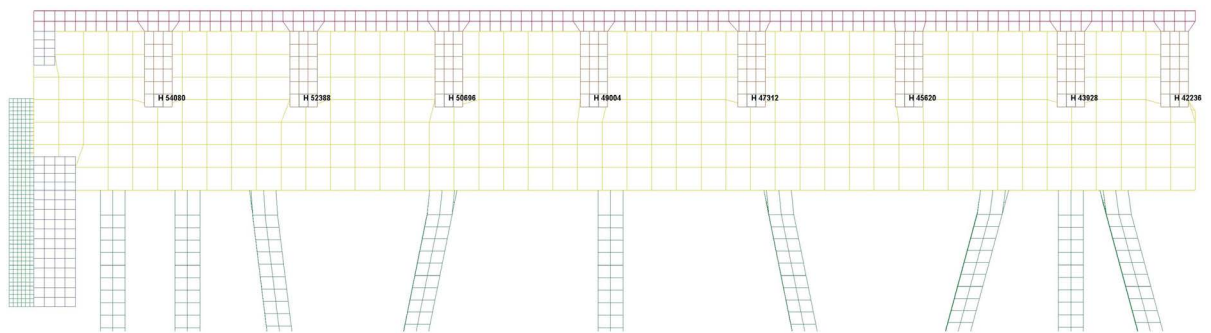


Figure 6. Tracking elements of right end

图 6. 码头右侧追踪单元示意图

码头右侧横向位移时程曲线见图 7(a), 可以看出码头离岸侧和近岸侧位移规律基本一致, 曲线波形与图 5(a)一致, 其上波动为码头结构的扭转振动所致。纵向位移时程曲线见图 7(b), 可以明显发现码头受撞击后发生的扭转振动反映在曲线上的波动情况, 离岸侧和近岸侧在扭转部分的位移规律差异明显, 呈现出几乎完全相反的形式。其原因为梁板式高桩码头的梁系结构相互牵制作用大, 码头整体性较好。



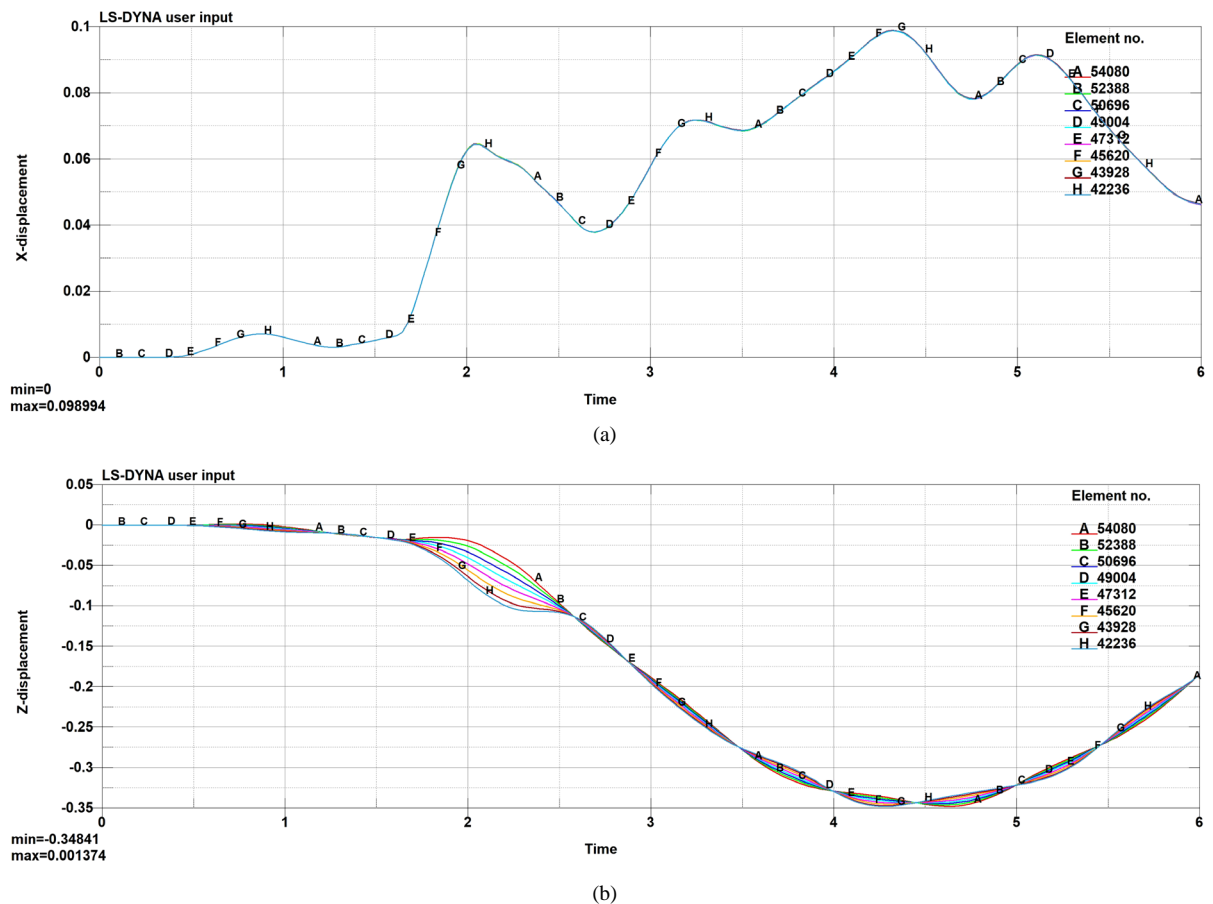


Figure 7. Displacement time history curve of right end (Unit: m)  
 图 7. 码头右侧位移时程曲线(单位: m)

### 3.3. 码头位移方向变化分析

位移矢量图能够完整反映碰撞过程中码头结构位移的大小及其方向的变化。码头结构在撞击力作用下，在 8 个不同时刻的位移矢量图如图 8 所示。

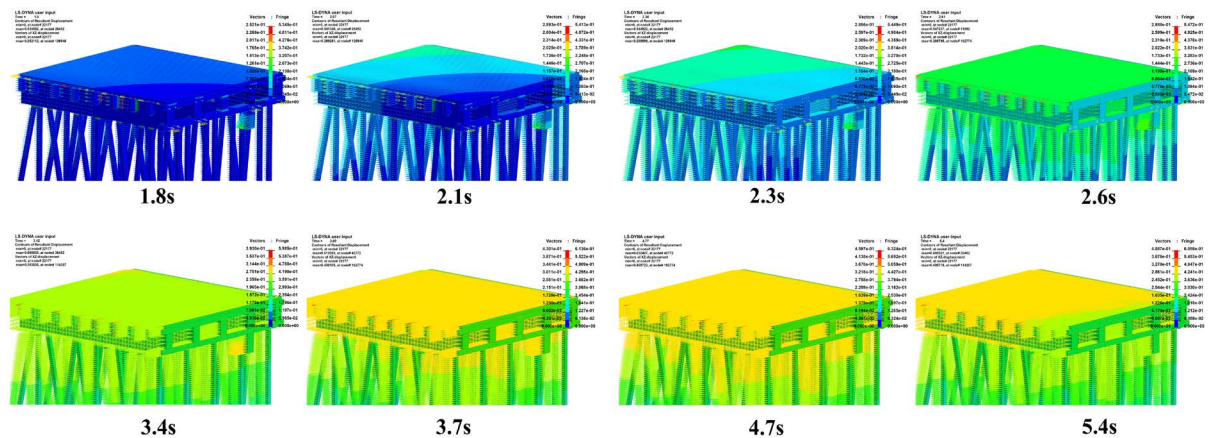


Figure 8. Displacement vector diagram of at different time (Unit: m)  
 图 8. 不同时刻码头结构位移矢量图(单位: m)

船舶与码头初步接触后,在 1.8 s 时可以发现撞击点处靠船构件的位移矢量最大,位移方向与船舶的入射方向一致。同时可以看到码头近岸侧开始出现位移变化,靠近撞击点的位移明显大于远离撞击点处的位移,即码头结构在右侧开始受到撞击时,出现了绕左侧离岸端逆时针旋转的趋势。2.1 s 至 2.6 s 的位移矢量图可以明显观察到码头结构在平动同时,伴随着显著的扭转现象,这期间撞击力达到峰值,可以看到码头结构江侧远离撞击点位置的位移变化不明显,码头绕左侧逆时针扭转的程度显著增大。随后码头结构的位移继续增大,在 4.4 s 左右时码头结构的位移达到峰值。5.4 s 时船舶已与码头分离,码头位移值逐渐减小,同时码头开始绕右侧顺时针扭转,且扭转中心逐渐向右侧过渡。随后码头将在扭转一定程度后回正,持续重复这一旋转过程直至停止。这是由于船舶脱离码头后,码头还具有动能,因此码头将通过不断振动直至能量完全耗散后停止。

### 3.4. 码头结构等效应力分析

通过等效应力云图可以看出船舶撞击码头结构的过程中应力的传递过程。码头受到撞击后不同时刻的等效应力云图见图 9。

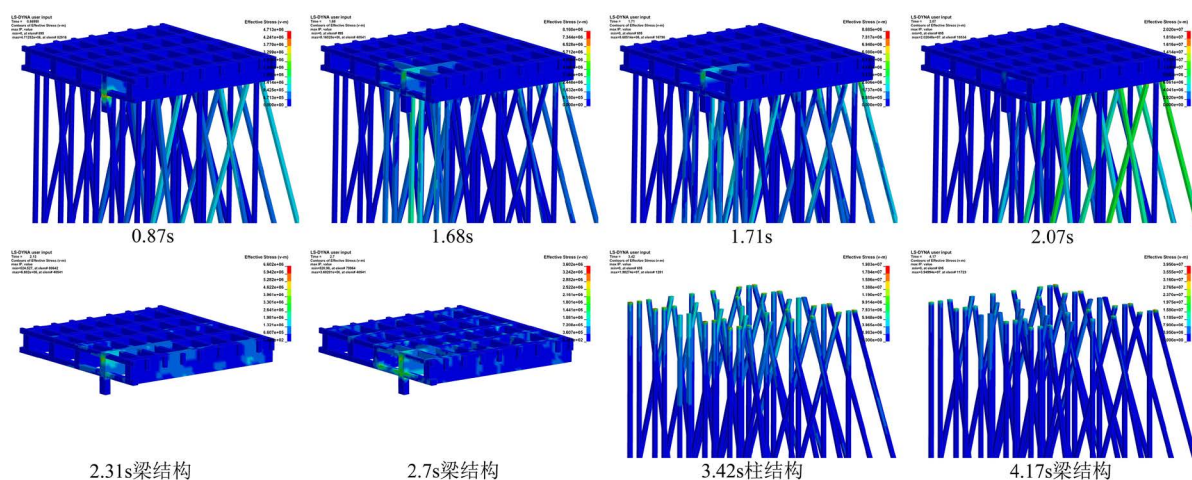


Figure 9. Equivalent stress nephogram of the wharf (Unit: Pa)

图 9. 码头结构等效应力云图(单位: Pa)

0.87 s 时刻为船舶与护舷接触阶段,这期间应力主要集中在撞击位置附近的构件与近岸侧的两根斜桩中,此时等效应力值较小,护舷吸收了大部分的能量。1.68 s 时橡胶护舷已经失效,码头受到的撞击力开始迅速增大,应力此时分布于离岸侧直桩,在 1.71 s 时已迅速由被撞排架的横梁传递至中部的桩。2.07 s 时撞击力达到峰值,应力传递至离岸侧斜桩。在 1.68 s 至 2.07 s 撞击力迅速增大的过程中,应力峰值在 0.4 s 内迅速由 8 MPa 增大到 22 MPa。由 2.31 s 和 2.7 s 时码头上部的梁结构的应力云图可以看出,在撞击力到达峰值至船舶脱离码头期间,应力仍不断从撞击处通过前端梁和纵梁传递至其他排架。船舶脱离码头后,码头结构仍将进行持续的伴随扭转的振动,这种运动形式导致桩与上部结构的连接处会出现应力集中的现象,等效应力的分布将在 3.42 s 与 4.17 s 的两种分布状态间不断切换,此时离岸侧斜桩桩顶的等效应力峰值已接近 40 MPa,远超过混凝土强度设计值 C30。

通过对码头结构受撞击过程的等效应力云图进行分析,可以发现码头结构在受到撞击时应力主要由离岸侧桩斜度较大的斜桩承担,此处为码头的薄弱位置。码头在受到撞击后的振动过程中,应力主要分布于桩与横梁连接处。因此在发生船撞事故后,除更换护舷、维修靠船构件外,应重点对撞击点附近的排架中的斜桩和各桩与上部结构连接处进行质量检测。

### 3.5. 码头结构加速度时程分析

图 10 为码头结构在受到撞击过程中横向和纵向的加速度 - 时间关系图, 其中红色曲线 A 为码头横向加速度时程曲线, 绿色曲线 B 为码头纵向加速度时程曲线。

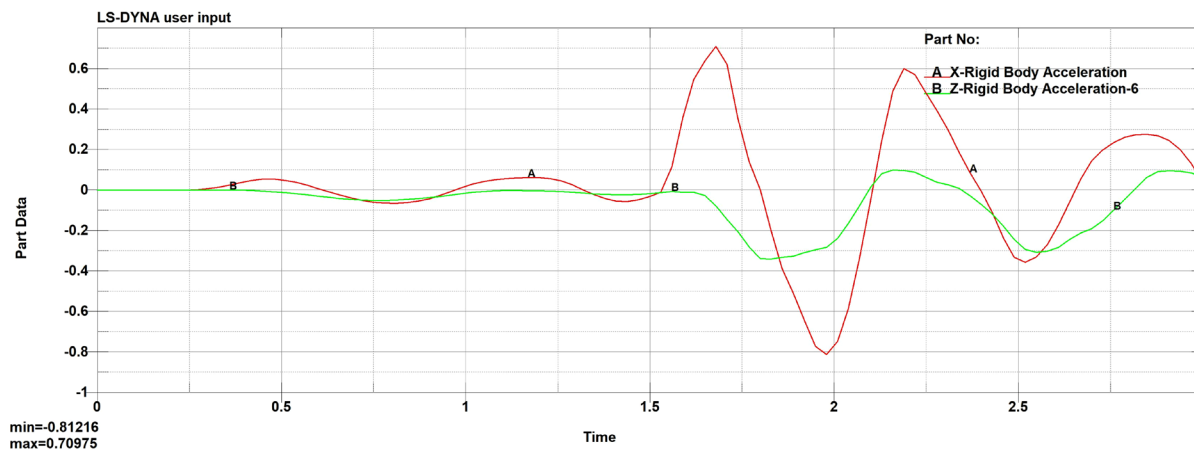


Figure 10. Acceleration time history curve of wharf structure (Unit:  $\text{m/s}^2$ )

图 10. 码头结构加速度时程曲线(单位:  $\text{m/s}^2$ )

通过图 10 可知, 码头结构在受到撞击后, 加速度时程曲线的振幅不断扩大, 且在 1.5 s 左右护舷失效后陡增, 说明振动随着碰撞的发生愈演愈烈。在船舶与码头分离后横向振动减弱, 加速度幅值开始逐渐降低。横向和纵向两个方向的加速度时程曲线呈现出相同的规律性, 这说明结构在这两个方向上的振动形式一致, 曲线形状类似于正弦函数。

## 4. 结论

本文通过对失控船舶撞击高桩码头的动态过程进行数值模拟分析, 得到以下结论: 1) 码头上部结构受到撞击后, 码头最高点处的位移最大, 位移自上至下逐渐减小。不同排架之间, 受撞击排架内的应力远大于其他排架; 2) 码头受到撞击后会出现较为明显的扭转, 撞击侧在撞击力作用下会绕着另一侧转动, 在船舶脱离后逐渐恢复至最初位置。由于码头仍具有动能, 码头将不断振动直到能量完全衰减后停止; 3) 码头应力最开始产生于撞击位置, 应力通过系船梁、前端梁等构件传递至其他横梁, 再通过横梁传递至桩和纵梁。在撞击过程中, 应力主要由码头离岸侧的斜桩承担。在船舶脱离后码头不断振动的过程中, 桩与上部结构的连接位置极为薄弱。当船撞事故发生后, 应重点对这些位置进行质量检测。

## 参考文献

- [1] 吉静. 内河高桩码头船舶作用的船 - 护舷 - 码头复合模型研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [2] 龙友立. 船舶靠泊内河大水位差高桩框架码头受力分析[J]. 珠江水运, 2017(14): 54-55.
- [3] 任启江. 高桩框架式码头在船舶撞击作用下动力响应分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.
- [4] 汪宏, 段金刚, 陈浩. 船舶失控撞击高桩码头结构的数值仿真分析[J]. 水运工程, 2015(6): 51-55+74.
- [5] 冯森. 船舶撞击高桩码头结构的动力响应分析[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
- [6] 中华人民共和国交通运输部. JTS 167-4-2012 港口工程桩基规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [7] 邱拓荒, 张颖, 孙克俐. 船舶撞击高桩码头的系统动力仿真研究[J]. 港工技术, 2013, 50(1): 37-39.
- [8] 张颖. 高桩码头船舶撞击力的动力分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2010.
- [9] 劳军, 成海亮, 姚森俊. 船舶 T 字型靠泊码头碰撞安全性分析[J]. 水道港口, 2016, 37(5): 497-501.