

船撞全直桩码头的损伤分析*

陈宇¹, 宋学伟¹, 曲树盛², 孙熙平²

(1. 中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 采用集中参数模型和附加质量法分别考虑桩-土相互作用和动水压力作用, 应用碰撞接触算法模拟船舶与码头碰撞效应, 对全直桩码头进行了船舶撞击作用下的动力损伤分析。结果表明, 考虑动水压力作用对船撞码头的碰撞力、码头位移和基桩损伤影响较小, 基本可以忽略; 考虑桩-土相互作用对船撞码头的位移和基桩损伤影响较大, 不可忽略。同时分析了撞击位置、撞击角度和撞击速度对船撞码头结构损伤的影响。结果表明, 撞击位置在码头边缘、撞击角度为 90° (垂直于码头前沿) 时对码头不利; 撞击速度越大, 码头破坏越严重。

关键词: 船舶; 全直桩码头; 碰撞; 损伤分析

中图分类号: U 656.1; TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0056-08

Damage analysis of all-vertical-piled wharf under ship's impact load

CHEN Yu¹, SONG Xuewei¹, QU Shusheng², SUN Xiping²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China)

Abstract: By simulating the pile-soil interaction and hydrodynamic pressure with the lumped parameter model and added mass method, respectively, this paper uses the contact algorithm to simulate the collision between ship and wharf, so as to analyze the dynamic damage to the all-vertical-piled wharf under a ship's impact load. The results indicate that the hydrodynamic pressure on the piles has almost no influence on the collision force, wharf displacement, and damage index of the pile, which is neglectable, while the pile-soil interaction has a non-negligible influence on the wharf displacement and damage index of the pile. In addition, this study investigates the influences of different impact positions, impact angles, and impact speeds on the damage to the wharf structure. The results indicate that the collision position at the edge of the wharf and the impact angle of 90° (perpendicular to the wharf) are detrimental to the wharf, and a faster impact speed means more serious damage to the wharf.

Keywords: ship; all-vertical-piled wharf; collision; damage analysis

近年来, 随着国家航运业的大发展, 船舶吨位和停靠密度不断提高, 船撞码头的重大事故频发, 如 2014 年“Fortune Sun”号货轮撞击到天津港高桩码头, 导致 3 根基桩断裂、1 根基桩发生较大位移; 2017 年绍尔群岛籍“CTI CONDOTTI”号 6.6 万 t 汽油船在靠泊过程中由于船员操作失误导致船撞事故, 造成 4 根基桩倾斜破坏^[1]。由此

可见, 基桩是船撞事故中最易发生破坏的部位。新近发展的全直桩码头结构的水平刚度较传统含有叉桩的高桩码头结构小, 其抗撞性能尚不清楚。

目前, 国内外学者开展船撞结构的研究主要有试验法和数值法。试验法通过碰撞模型试验实测碰撞力并获得结构的动力响应, 但由于试验费用昂贵, 且试验具有破坏性和危险性, 因此实施

收稿日期: 2022-07-04

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2600500); 天津市教委科技计划项目 (2021KJ059)

作者简介: 陈宇 (1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为工程结构防灾减灾。

较为困难。在数值法研究方面, 利用非线性有限元分析技术可以较为精确地模拟船舶和结构两者复杂的几何形状、材料本构、损伤破坏过程。国内外学者针对船撞力学分析与等效简化、碰撞模拟分析等方面开展了广泛的研究并取得了较为丰富的研究成果, 然而大部分的研究主要针对船-桥碰撞问题^[2-6], 对船撞码头结构的研究主要关注船舶停靠码头的碰撞效应问题^[7-8], 而船舶偶然撞击码头的研究非常有限。张淑华等^[9]对 5 000 t 船偶然撞击一榀高桩码头做了仿真分析, 并对碰撞中的能量转化情况和碰撞力对结构的动力作用进行了分析, 但并未考虑桩-土相互作用和动水压力作用, 同时一榀高桩码头的船撞分析忽略了结构整体的约束效应。邓雷飞等^[10]采用有限元技术以 3 万吨级散货船撞击高桩码头的全过程分析了船舶在整个碰撞过程中能量的转化和撞击力变化规律, 采取弹性的结构模型, 未考虑结构非线性特性。

本文以全直桩码头为研究对象, 建立了考虑

桩-土相互作用和动水压力作用的全直桩码头结构模型和船舶精细化模型, 并考虑船体和结构之间的非线性碰撞效应。通过计算得到了碰撞力、结构变形和损伤的时序结果, 定量分析了码头结构的动力响应过程, 并且分析了桩-土相互作用和动水压力作用的影响以及碰撞位置、碰撞角度和船舶速度等不同参数对码头结构损伤的影响规律。

1 数值计算模型

1.1 码头结构模型及参数

研究对象为某港离岸深水全直桩无梁式码头结构, 码头排架间距为 15 m, 首尾桩中心距为 36 m, 4 根基桩均采用壁厚 20 mm、 ϕ 1 800 mm 的 Q345 钢管桩, 桩基自由高度为 32.5 m, 入土深度为 44.5 m; 码头面板由钢筋混凝土制成, 混凝土标号为 C40, 板中钢筋为 Q345, 配筋率为 0.9%, 板厚为 2 m, 码头结构剖面见图 1。码头所处水域设计高水位为 3.82 m, 所处地质参数见表 1。

表 1 土层参数

土层 序号	泥面以下 深度/m	土层 名称	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	固结快剪		泊松比	压缩模量/ MPa
				$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa		
1	0~13.5	极软砂质黏土	1.78	15	16.3	0.35	4.07
2	13.5~27.0	中等密实粉砂	1.93	34	3.0	0.31	9.50
3	27.0~34.0	非常密实粉砂	2.05	36	5.0	0.28	16.00
4	34.0~42.0	硬黏土	1.90	18	30.0	0.25	18.00
5	42.0 以下	非常密实粉砂	2.05	36	5.0	0.28	16.00

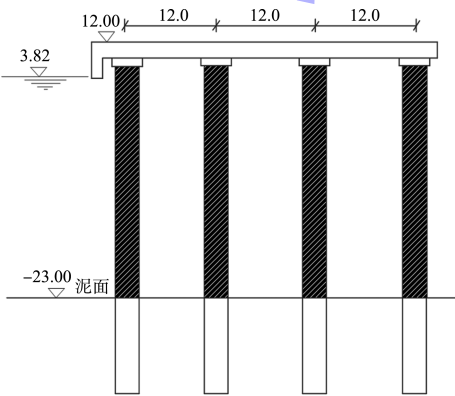


图 1 全直桩码头结构剖面 (单位: m)

采用 LS-DYNA 有限元程序中的梁单元模型模拟码头结构排架的基桩构件, 基桩沿轴向离散成 154 个梁单元, 每个梁单元长度为 0.5 m。码头面

板采用钢筋混凝土弥散实体单元模型, 单元尺寸为 200 mm, 全直桩码头结构有限元模型见图 2。

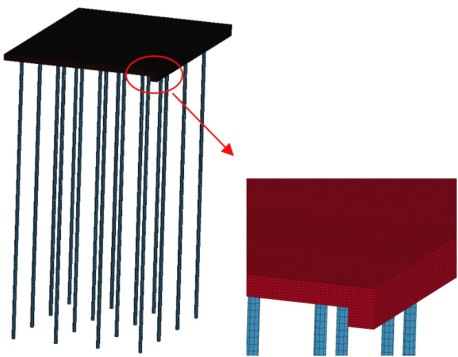


图 2 全直桩码头结构有限元模型

1.2 桩-土相互作用模型

文献[11]表明, 改进的 Penzien 集中质量模型

计算效率高、参数选取简单,并且可以较好地考虑桩-土相互作用后结构的动力特性变化。该模型通过水平桩-土相互作用弹簧和阻尼器来表征桩与土之间的相互作用,并在桩周土之间增加土的剪切弹簧和阻尼器来表征桩周土之间的相互作用。各土层桩-土相互作用的水平弹簧刚度 $k_{h,i}$ 计算公式为:

$$k_{h,i} = \frac{8\pi E_i}{3} \left\{ \operatorname{arcsinh} \frac{h_i - z_i}{b} + \operatorname{arcsinh} \frac{h_i + z_i}{b} + \frac{2}{3b^2} \left[\frac{b^2 h_i - 2b^2 z_i + h_i z_i^2 + z_i^3}{[b^2 + (h_i + z_i)^2]^{1/2}} - \frac{z_i^3 - 2b^2 z_i}{(b^2 + z_i^2)^{1/2}} \right] - \frac{2}{3} \left[\frac{z_i - h_i}{[b^2 - (h_i - z_i)^2]^{1/2}} - \frac{z_i}{(b^2 + z_i^2)^{1/2}} \right] + \frac{4}{3} \left[\frac{b^2 z_i + h_i z_i^2 + z_i^3}{[b^2 + (h_i + z_i)^2]^{3/2}} - \frac{b^2 z_i + z_i^3}{(b^2 + z_i^2)^{3/2}} \right] \right\}^{-1} \quad (1)$$

式中: E_i 为第 i 层土弹性模量; h_i 为第 i 层土厚度; z_i 为第 i 层土中心深度; b 为桩半径。

水平阻尼系数 c_h 计算公式为:

$$\begin{cases} c_{h,1} = 2bh_1\rho_{s,1}(v_{p,1} + v_{s,1}) \\ c_{h,i} = 2b[h_i\rho_{s,i}(v_{p,i} + v_{s,i}) + h_{i+1}\rho_{s,i+1}(v_{p,i+1} + v_{s,i+1})] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $v_{p,i}$ 为第 i 层土纵波波速; $v_{s,i}$ 为第 i 层土剪切波波速; $\rho_{s,i}$ 为第 i 层土密度。

土层间弹簧刚度与阻尼计算公式为:

第 i 层间剪切弹簧刚度:

$$k_{v,i} = G_i A_{s,i} / h \quad (3)$$

第 i 层间剪切阻尼系数:

$$C_{v,i} = (2\beta_i / \omega_s) k_{v,i} \quad (4)$$

式中: G_i 为第 i 层土的剪切模量; β_i 为第 i 层土的阻尼; ω_s 为土层的一阶圆频率; $A_{s,i}$ 为第 i 层土的面积。

1.3 动水压力作用模型

全直桩码头基桩属于小直径柱体,而小直径柱体在动力荷载作用下的动水压力可采用 Morison 方程进行求解。Morison 方程假定小直径柱体受到的动水压力由惯性力和阻尼力线性叠加组成,同时忽略结构对水体运动产生的影响,认为水对结构的作用分别由未受扰动的加速度场和速度场引起的沿水体运动方向作用于结构上的惯性力和阻尼力组成。水对单位长度柱体动水压力 P_{plw} 的计算公式为:

$$P_{plw} = \frac{\pi}{4} \rho_w (C_M - 1) d^2 (\ddot{u} - \ddot{x}_0) + \frac{\pi}{4} \rho_w d^2 \dot{u} + \frac{1}{2} C_D \rho_w d |\dot{u} - \dot{x}_0| (\dot{u} - \dot{x}_0) \quad (5)$$

式中: ρ_w 为水体密度; d 为桩直径; \dot{x}_0 和 \ddot{x}_0 分别为结构的绝对速度和绝对加速度; C_M 和 C_D 分别为惯性力系数和黏性摩擦阻尼力系数; \dot{u} 和 \ddot{u} 分别为水的速度和加速度。

假定水体静止,不考虑水中波浪与水流的影响,即 $\dot{u} = \ddot{u} = 0$,这时公式(5)为:

$$P_{plw} = -\frac{\pi}{4} \rho_w (C_M - 1) d^2 \ddot{x}_0 - \frac{1}{2} C_D \rho_w d |\dot{x}_0| \dot{x}_0 \quad (6)$$

由于动水阻尼力引起结构的动力响应不大,故可以忽略动水阻尼力的影响,进而可得:

$$P_{plw} = -\frac{\pi}{4} \rho_w (C_M - 1) d^2 \ddot{x}_0 \quad (7)$$

根据文献[12],小直径桩体的动水压力作用采用附加质量模拟,其群桩的动水压力效应可以通过群桩效应系数 K_g 加以考虑,因此每个长度为 l 的桩附加质量计算公式为:

$$m_{plw} = K_g (C_M - 1) \frac{\pi}{4} \rho_w d^2 l = K_g C_a \frac{\pi}{4} \rho_w d^2 l \quad (8)$$

式中: C_a 为动水附加质量系数。

1.4 船舶模型及参数

参考 5 000 吨级杂货船的型线数据和结构形式,船舶的主要参数为:船长 108 m,型宽 16 m,型深 8 m,满载吃水 6 m。船舶模型主要由船艏和船身两部分组成,船舶的有限元模型见图 3,模型采用壳单元来模拟船舶结构,壳单元厚度取 15 mm。

船舶撞击码头结构的碰撞效应采用罚函数碰撞接触算法,在 LS-DYNA 中通过定义*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 实现,其船舶与码头面之间碰撞过程的摩擦系数取 0.3^[13]。

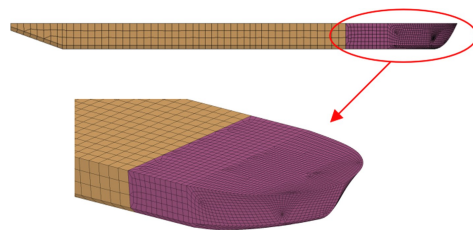


图 3 船舶有限元模型

2 材料本构模型

2.1 混凝土材料模型

混凝土采用 K&C 混凝土本构模型,该模型综合考虑了混凝土的大应变、高应变率、高压效应,能很好地描述高应变率条件下混凝土的响应问题^[14]。在 LS-DYNA 中, K&C 混凝土本构模型通过定义 *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 来实现,模型参数只需定义混凝土密度和极限抗压强度。

2.2 钢材料模型

2.2.1 基桩构件钢材料模型

基桩构件的钢材料模型考虑钢材刚度退化和强度退化过程的钢材损伤本构模型,该模型的损伤演化法则 \dot{d} 定义为^[15]:

$$\dot{d} = -d\lambda \frac{\partial f_d}{\partial Y} = \frac{(d_{cr} - d_0)^{1/\nu}}{\ln(\varepsilon_u - \varepsilon_{th})} f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) (d_{cr} - d)^{1-1/\nu} \frac{\Delta\kappa}{\kappa} \quad (9)$$

式中: Y 为与损伤相关联的变量; ν 为损伤参数; ε_u 为钢材失效时累积等效塑性应变; ε_{th} 为损伤开始时累积塑性应变; d_0 为初始损伤值; d_{cr} 为钢材失效时损伤值,取 0.065; $f(\sigma_m/\sigma_{eq})$ 为考虑三轴应力状态时的影响因子。 κ 为体积模量, $\Delta\kappa$ 为体积模量变化量。

文献[15]给出了钢材低周反复试验的损伤演化过程,并对钢材损伤指数进行线性回归分析确定钢材的损伤等级,对应的损伤指数为:轻微损伤为 0~0.007 5,中等损伤为 0.007 5~0.025 0,严重损伤为 0.025 0~0.036 0,破坏失效为 0.036 0~0.065 0。

2.2.2 船用钢材料模型

考虑到船舶撞击损伤区域的局部性,船首可变形部分采用线性强化弹塑性材料模型,即考虑材料进入塑性后的应变强化。在 LS-DYNA 中通过定义关键字 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 来实现,并通过 Cowper-Symonds 模型考虑材料的应变率效应。材料的屈服应力 σ_y 可表示为:

$$\sigma_y = \left[1 + (\dot{\varepsilon}/C)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p) \quad (10)$$

式中: σ_0 为材料屈服强度; p 、 C 为应变率参数;

β 为调整等向强化与随动强化的参数; E_p 为塑性硬化模量; ε_{eff}^p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变变化率。船用钢材料模型参数为:密度 ρ 为 7.85 t/m³,弹性模量 E 为 206 GPa,泊松比 ν 为 0.3,材料屈服强度 σ_0 为 235 MPa,强化模量 E_t 为 1.2 GPa, C 为 40.4 s⁻¹, p 为 5。

3 计算结果分析

3.1 动水压力作用的影响

为了分析动水压力作用对船撞码头动力响应的影响,分析模型中考虑 2 种工况:1)不考虑动水压力作用;2)考虑动水压力作用。船舶的初始速度为 5 m/s,船头顶面与码头面板上端平齐,船撞全直桩码头位置位于码头中部,其撞击位置如图 4 所示。

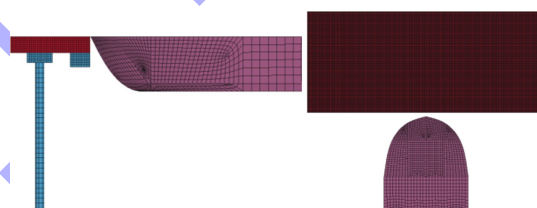
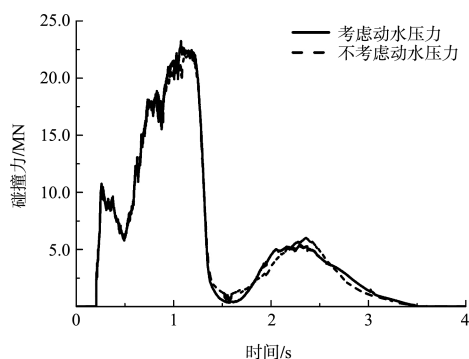
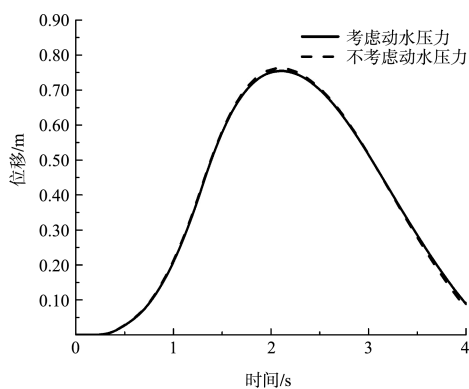


图4 船撞码头

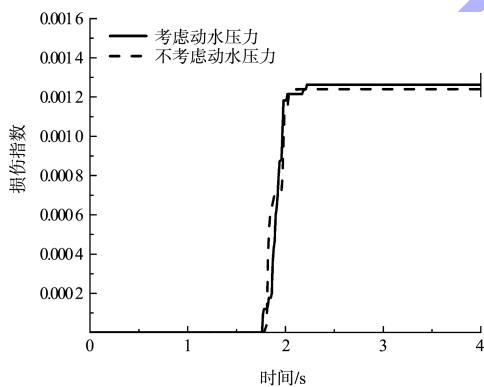
图 5a) 为考虑动水压力作用影响的碰撞力时程曲线。从图中可以看出,2 种工况的碰撞力时程曲线趋势基本一致,考虑动水压力和不考虑动水压力时碰撞力最大值分别为 23.2、22.1 MN,考虑动水压力比不考虑动水压力碰撞力的最大值增大 5.0%。图 5b) 为不同工况下码头的位移时程曲线。从图中可以看出,2 种工况的码头位移时程曲线基本重合,考虑动水压力和不考虑动水压力时位移最大值分别为 0.75、0.76 m,考虑动水压力比不考虑动水压力位移的最大值减小 1.3%。提取基桩钢材的损伤演化时程曲线见图 5c)。从图中可以看出,2 种工况的基桩损伤时程曲线基本重合,考虑动水压力和不考虑动水压力时基桩最大损伤指数分别为 0.001 3、0.001 2,均属于轻微损伤程度。通过上述分析可知,动水压力作用对船舶撞击力、码头最大位移和桩基损伤指数影响较小,因此可以忽略不计。



a) 碰撞力



b) 码头位移



c) 基桩钢材的损伤演化

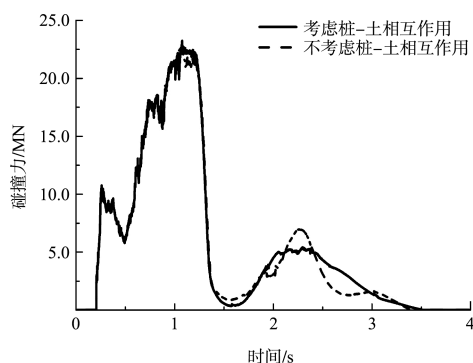
图 5 不同动水压力工况下各参数变化时程曲线

3.2 桩-土相互作用的影响

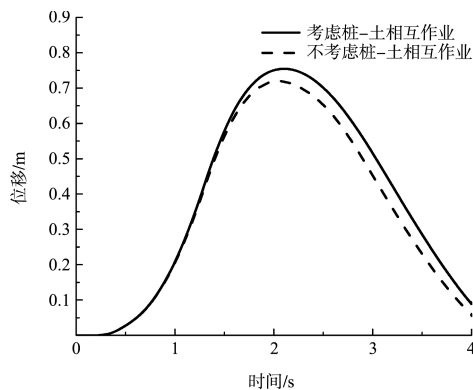
为了分析桩-土相互作用对船撞码头动力响应的影响，分析模型中考虑 2 种工况：1) 考虑桩-土相互作用；2) 不考虑桩-土相互作用，即刚性地基。船舶的初始速度为 5 m/s，船撞位置位于全直桩码头中部。

图 6a) 为碰撞力时程曲线。从图中可以看出，2 种工况的碰撞力时程曲线在 1.5 s 之前基本一致，

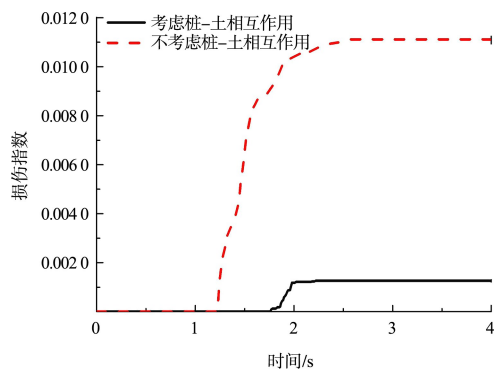
且最大撞击力基本相同；在 2.3 s 左右考虑桩-土相互作用和不考虑桩-土相互作用的碰撞力峰值分别为 5.4、7.0 MN，考虑桩-土相互作用时减小了 29.6%。图 6b) 为码头的位移时程曲线。从图中可以看出，2 种工况码头的位移时程曲线在 1.5 s 之前基本一致，之后考虑桩-土相互作用的位移增大 4.2%。图 6c) 为基桩钢材的损伤演化时程曲线。从图中可以看出，不考虑桩-土相互作用影响基桩损伤时间出现在 1.2 s，较考虑桩-土相互作用影响基桩开始损伤的时间 1.8 s 提前，且随着碰撞的进行，不考虑桩-土相互作用影响的基桩损伤指数急剧增大，最大损伤指数为 0.011 1，属于中等损伤程度；考虑桩-土相互作用影响的基桩最大损伤指数为 0.001 3，属于轻微损伤程度。通过上述分析可知，考虑桩-土相互作用增大了撞击后结构位移响应，显著减小了桩基的损伤指数，因此在评估船撞结构分析中应考虑桩-土相互作用的影响。



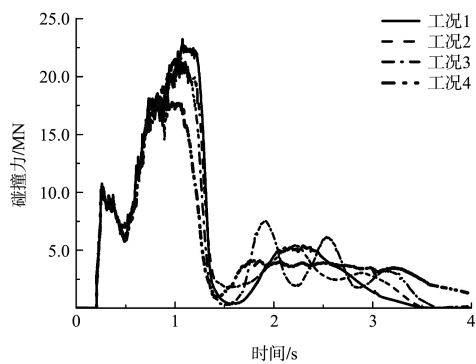
a) 碰撞力



b) 码头位移



c) 基桩钢材的损伤演化



a) 碰撞力

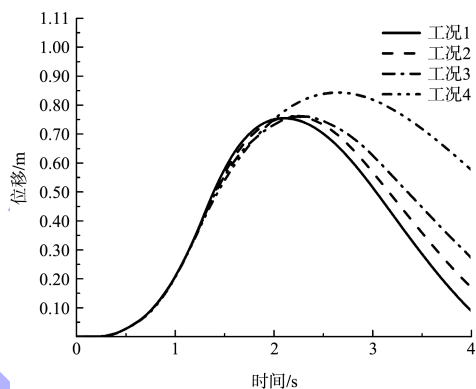
图6 不同桩-土相互作用工况下各参数变化时程曲线

3.3 参数分析

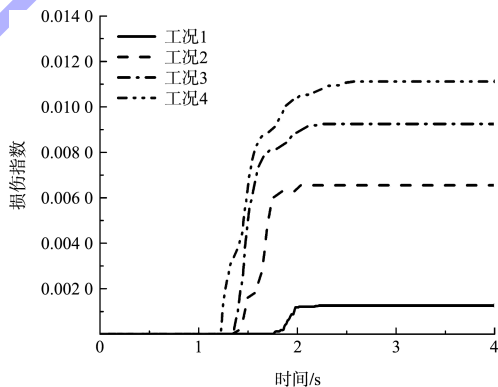
3.3.1 不同撞击位置

为了分析船撞码头不同位置引起的结构响应,选取4种撞击位置,工况1~4分别为距码头中轴线0、7.5、15.0、22.5 m。

图7a)为4种不同撞击位置的碰撞力时程曲线。从图中可以看出,工况1~4的撞击力峰值分别为23.2、21.9、21.4、19.3 MN,随着撞击位置离码头中部越远,撞击力越小,原因是撞击位置越靠近码头结构段的边缘,码头面越易出现扭转,相同船舶速度下碰撞力减小。图7b)为不同工况下码头的位移时程曲线。从图中可以看出,工况1~4的位移峰值分别为0.75、0.76、0.76、0.84 m,其中工况1~3的位移峰值基本一致,工况4的位移峰值明显增大,其原因是工况4中船舶撞击在码头边缘导致结构扭转相对严重,离撞击部位较远处的基桩对水平刚度的贡献减小,导致码头整体水平位移增加。图7c)为基桩钢材的损伤演化时程曲线。从图中可以看出,工况1~4的基桩损伤指数最大值分别为0.0013、0.0066、0.0093、0.0111,撞击位置越靠近码头结构段的边缘,基桩损伤指数越大,其中工况1、2基桩损伤属于轻微损伤程度,工况3、4基桩损伤属于中等损伤程度。



b) 码头位移



c) 基桩钢材的损伤演化

图7 不同撞击位置工况下各参数变化时程曲线

3.3.2 不同撞击角度

为分析船舶以不同角度撞击码头的结构响应,选取3种工况,分别为船舶轴线与码头前沿线夹角30°、60°、90°。

图8a)为3种不同撞击角度的碰撞力时程曲线。从图中可以看出,撞击角度为30°、60°和90°3种工况的撞击力峰值分别为9.3、15.0、23.2 MN,

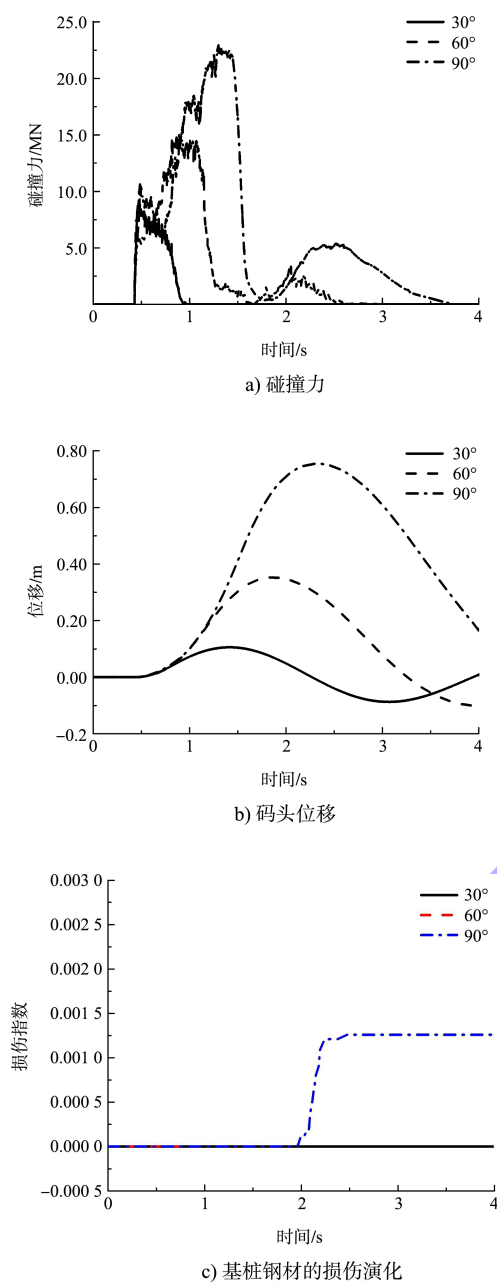


图8 不同撞击角度工况下各参数变化时程曲线

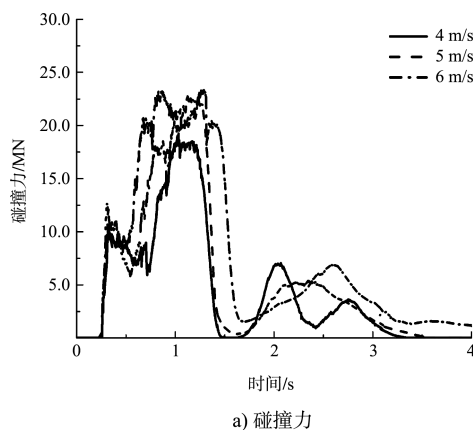
随着撞击角度的增加,撞击力增大,原因是相同船舶速度下,撞击角度越大其垂直于码头前沿的速度分量越大,从而导致撞击力越大。同时可以看出,撞击角度 30° 工况下撞击力仅存在 1 个峰值,是由于垂直于码头前沿的速度分量较小,撞击引起的船头部分变形较小,撞深未达到船头内肋板加劲部分,所以未出现第 2 个峰值。图 8b) 为 3 种不同撞击角度的码头位移时程曲线。从图中可

以看出,3 种撞击角度的位移峰值分别为 0.11、0.35、0.75 m。随着撞击角度的增加,码头位移增大。图 8c) 为基桩钢材的损伤演化时程曲线。从图中可以看出,3 种撞击角度中仅垂直撞击码头 (90°) 时桩基发生损伤,其损伤指数为 0.001 3,属于轻微损伤程度。

3.3.3 不同船舶速度

为分析船舶以不同速度撞击码头的结构响应,选取 3 种工况,分别为船舶速度 4、5、6 m/s。

图 9a) 为 3 种不同船舶速度的碰撞力时程曲线。从图中可以看出,3 种不同船舶速度撞击下的撞击力分别为 19.2、23.2、23.5 MN,随着船舶速度增大,撞击力增大,但速度从 5 m/s 提高到 6 m/s 时,船舶撞击力仅增大了 1.3%,原因是船头内部的刚度一定,2 种工况碰撞过程的船头均发生塑性变形,船头发生屈服的撞击力一定,因此撞击速度并不会明显提高瞬时碰撞力。图 9b) 为 3 种不同船舶速度的码头位移时程曲线。从图中可以看出,3 种不同船舶速度撞击下的码头位移峰值分别为 0.56、0.75、0.93 m。随着船舶速度的增加,码头位移明显增大。图 9c) 为基桩钢材的损伤演化时程曲线。从图中可以看出,3 种船舶速度撞击下基桩的最大损伤指数分别为 0、0.001 3、0.005 9,随着船舶速度的增加,码头基桩损伤指数增大,船舶速度为 5、6 m/s 的码头基桩损伤属于轻微损伤程度。



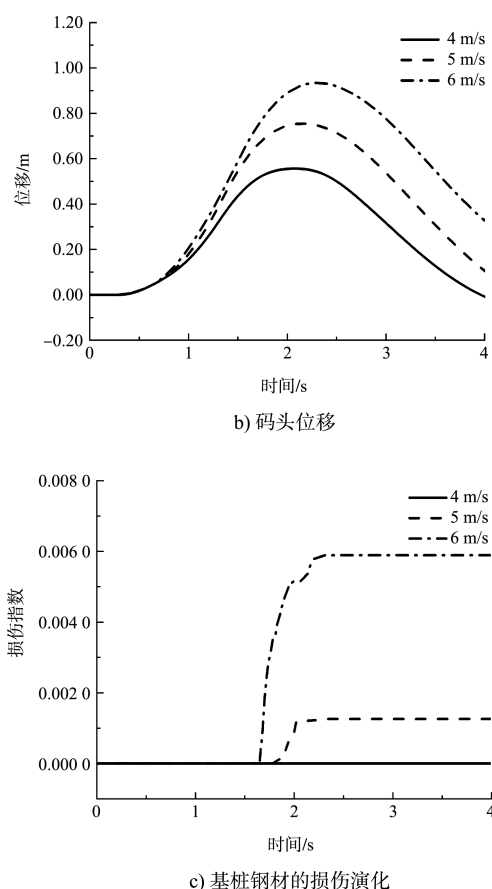


图9 不同船舶速度工况下各参数变化时程曲线

4 结论

1) 动水压力作用对船撞码头的碰撞力、码头位移和基桩损伤影响较小,基本可以忽略。

2) 考虑桩-土相互作用,增大了船撞码头的位移,但增大幅度较小;明显增大了基桩损伤指数;对撞击过程后期的撞击力影响较大,对峰值撞击力基本没有影响。因此船撞码头作用需考虑桩-土相互作用影响。

3) 撞击位置从码头中部向边部移动时,峰值撞击力逐渐减小,码头位移逐渐增大,基桩损伤指数逐渐增大。

4) 撞击方向与码头岸线的夹角逐渐增大时,峰值撞击力逐渐增大,码头位移逐渐增大,垂直岸线撞击时基桩损伤指数最大。

5) 相同船舶质量条件下,随着船舶撞击速度的增大,撞击力增大,码头位移增大,基桩损伤指数明显增大。

参考文献:

- [1] 陈宇,吕杨,齐广政,等. 船舶撞击荷载作用下高桩墩的破坏分析[J]. 水利水运工程学报, 2019(2): 25-32.
- [2] FAN W, YUAN W C, YANG Z, et al. Dynamic demand of bridge structure subjected to vessel impact using simplified interaction model[J]. Journal of bridge engineering, 2011, 16(1): 117-126.
- [3] 郭杰锋,朱斌,陈海君,等. 高桩防撞墩动力大变形分析及防撞设计新方法[J]. 海洋工程, 2010, 28(1): 9-17.
- [4] 王君杰,卜令涛,孟德巍. 船桥碰撞简化动力分析方法: 简化动力模型[J]. 计算机辅助工程, 2011, 20(1): 70-75.
- [5] MCVAY M C, WASMAN S J, CONSOLAZIO G R, et al. Dynamic soil-structure interaction of bridge substructure subject to vessel impact[J]. Journal of bridge engineering, 2009, 14(1): 7-16.
- [6] 田力,黄飞. 考虑流体效应的船-桥碰撞数值模拟法研究[J]. 工程力学, 2015, 32(8): 120-128.
- [7] 张颖. 高桩码头船舶撞击力的动力分析[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [8] 陆志慧,吴中,项敏. 船舶与钢管板桩码头碰撞仿真分析[J]. 大连交通大学学报, 2014, 35(1): 20-23.
- [9] 张淑华,李攀,江君. 船舶与高桩码头碰撞过程的数值模拟[J]. 水运工程, 2012(6): 97-101, 109.
- [10] 邓雷飞,李越松,郭畅. 船舶撞击码头动力响应有限元分析[J]. 水运工程, 2013(8): 92-96.
- [11] 陈宇,李忠献,李宁. 多介质体作用下近海桥梁的地震损伤分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(10): 91-98.
- [12] 陈宇. 近海大跨度桥梁强震损伤分析与控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [13] SHA Y Y, HAO H. Laboratory tests and numerical simulations of barge impact on circular reinforced concrete piers[J]. Engineering Structures, 2013, 46(1): 593-605.
- [14] 师燕超,李忠献,郝洪. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土框架结构的连续倒塌分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(6): 652-658.
- [15] 陈宇,石运东,孙熙平. 离岸深水全直桩码头的地震损伤分析[J]. 振动工程学报, 2020, 33(1): 111-119.

(本文编辑 王传瑜)