DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.016
陈宇, 孙熙平, 李越松. 施工期台风浪作用下沉箱碰撞破坏分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 112-118. (CHEN Yu, SUN Xiping, LI Yuesong. Pounding damage analysis of caissons during construction under action of storm wave[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4): 112-118. (in Chinese))

施工期台风浪作用下沉箱碰撞破坏分析

陈 宇, 孙熙平, 李越松
(交通运输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: 以"莎莉嘉"台风引起施工期沉箱碰撞破坏为背景,研究台风浪作用下施工期沉箱碰撞破坏模式及机理。提出基于台风浪作用下沉箱碰撞反应分析两步走的数值模拟方法,该方法利用高精度流体模拟软件 Flow-3D 的造波技术模拟台风引起的波浪传播过程,并与沉箱结构作用获取沉箱波浪力时程曲线;建立沉箱精细化有限元模型,将上述波浪力时程曲线施加于沉箱结构,利用 LS-DYNA 显式求解器分析沉箱结构的碰撞反应。应用该方法对"莎莉嘉"台风引起施工期沉箱碰撞破坏进行分析,结果表明:数值模拟的沉箱结构在不同波浪方向作用下发生不同角度的碰撞会导致不同的沉箱碰撞破坏模式,波浪作用方向与沉箱前后壁夹角为 60°时,沉箱碰撞破坏模式与"莎莉嘉"台风作用期间的现场情况吻合较好。

关 键 词: 沉箱; 台风; 波浪; 碰撞; 破坏模式
中图分类号: U656 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2018)04-0112-07

我国拥有漫长的海岸线,包括东部的渤海、黄海、东海以及南部的南海。随着近几年国家经济的快速发展,沿海开发码头、人工岛等大型工程越来越多,体量越来越大,而我国又是受台风袭击较为严重的国家之一,尤其东海、南海沿岸受热带气旋引起的台风灾害严重。如 2016 年 10 月我国南部发生的"莎莉嘉"台风导致正在施工的沉箱护岸结构发生严重破坏。经调查发现,施工期沉箱在台风浪作用下发生碰撞破坏是其主要破坏形式。因此,研究台风浪作用下沉箱碰撞破坏模式及破坏机理对提高施工期沉箱抗浪抗撞性能具有重要指导意义。

关于台风浪作用下沉箱的碰撞破坏分析,首先需要确定作用在沉箱结构上的波浪力,现有的 Morsion 方程[1-2]和绕射波浪理论[3-4]只针对柱体波浪力进行求解,无法求解直立式沉箱结构的波浪力,而《港口与航道水文规范》[5]虽然给出了直立结构上的波浪力分布,但只能确定沉箱上的波浪力大小,要想得到沉箱碰撞过程的运动趋势,必须获得作用在沉箱上的波浪力时程。其次,结构间发生碰撞的时间短,应力波会在结构中传播,导致结构发生非线性变形[6],因此需建立较为精细的有限元模型,准确模拟瞬时碰撞导致结构的破坏效应[7]。传统模拟技术往往需要实现波浪模型和结构模型一体化建模,并实现结构间碰撞效应的模拟,计算量大,计算成本高,或因采用大尺寸有限元网格而降低计算精度[8]。

本文提出一种将台风浪作用下施工期沉箱碰撞反应分析分两步走的数值模拟方法。第一步,利用高精度流体模拟软件 Flow-3D 的 FAVOR 网格技术建立流体网格,采用连续性方程和 Navier-Stokes 方程作为控制方程,通过 GMRES(Generalized Minimum RESidual)隐式算法求解压力-速度耦合方程组,获得波浪作用于沉箱结构的波浪力时程;第二步,建立沉箱结构精细化模型,并将第一步获得的波浪力时程施加于沉箱结构,利

收稿日期: 2017-10-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802204-1,2016YFC0802209); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(TKS170109, TKS150204)
作者简介: 陈 宇(1987—), 男, 天津人, 助理研究员, 博士, 主要从事工程结构的动力计算和防灾减灾研究。
E-mail: tjucy@tju.edu.cn

用 LS-DYNA 显式求解器[9]分析波浪作用下沉箱结构间的碰撞反应和破坏过程。将该方法应用于“莎莉嘉”台风引起施工期沉箱的碰撞破坏分析，研究了台风引起的波浪作用方向与沉箱结构碰撞破坏模式之间的关系。

1　“莎莉嘉”台风引起的施工期沉箱碰撞破坏

1.1　工程概况

如意岛填海工程位于海口市美兰区北部外海域，利用海域面积为 715.75 万 m^2，填海工程护岸采用直立式沉箱结构形式。沉箱并排布置于抛石基床上，2 个沉箱平行安装间距为 20 cm，沉箱尺寸如图 1 所示。设计中沉箱混凝土为 C40，钢筋为 HRB400，钢筋配筋率为 0.8%，工程设计水深为 7.35 m。

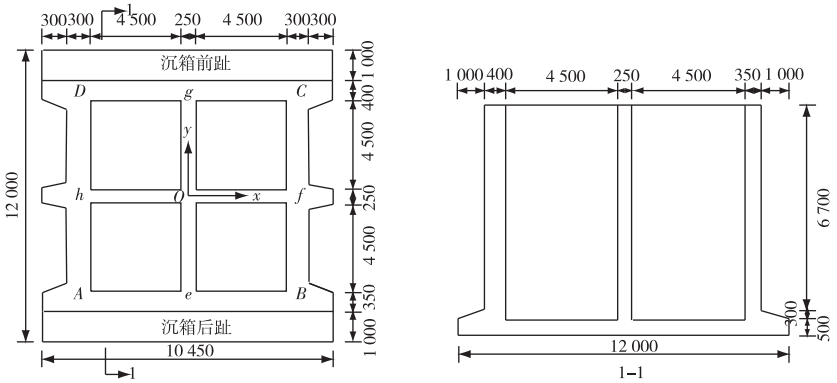


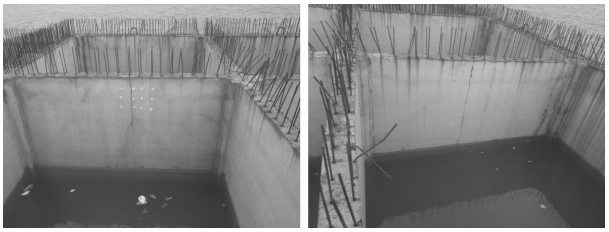
图 1　沉箱尺寸（单位：mm）

Fig. 1　Caisson sizes (unit: mm)

1.2　事故概况

2016 年 10 月 18 日上午第 21 号台风“莎莉嘉”在海南省万宁市和乐镇沿海登陆，登陆时中心附近最大风力 14 级，中心最低气压 955 hPa。由于无法获得台风发生时所在水域的波浪信息，根据文献[10]的台风特征参数及台风风速预报台风浪波高的回归参数，可得 14 级台风作用为主导因素的台风浪的有效波高为 5.0 m，平均周期为 8.8 s。

2016 年 11 月交通运输部天津水运工程科学研究所交通水运工程试验检测中心人员对受损沉箱进行了现场检测，沉箱间碰撞引起的破坏主要表现为 4 个内隔板 *Oe*，*Of*，*Og*，*Oh*（位置编号见图 1）出现不同程度裂缝，而沉箱 4 个外壁未发现明显的裂缝破坏。图 2 为现场检查发现沉箱内隔板裂缝情况。图 2（a）为沉箱内隔板 *Oh* 发生竖向裂缝，图 2（b）为沉箱内隔板 *Og* 发生竖向裂缝。同时现场发现裂缝主要集中于内隔板中部和端部节点处。



(a) 裂缝1　　(b) 裂缝2

图 2　沉箱内隔板裂缝

Fig. 2　Cracks of caisson interior walls

2　沉箱结构的波浪力时程

本文主要研究海南如意岛工程的护岸沉箱结构在“莎莉嘉”台风引起的台风浪作用下结构所受波浪力作用时程。高精度流体模拟软件 Flow-3D 的造波技术[11]为用户提供了三维波浪力对沉箱结构作用的求解。由于无法获得事故发生时波浪作用方向与沉箱 x 向（沿沉箱前后壁方向）的夹角，分析时取夹角在 0°~90°范围内每隔 30°为 1 种工况，当夹角为 90°时波浪力作用方向与沉箱并排方向垂直，导致并排放置的沉箱无法

发生碰撞,因此仅考虑 3 种工况进行分析,分别是波浪作用方向与 x 向的夹角为 0°,30°,60°。以波浪作用方向与 x 方向夹角为 0°为例阐述模型的建立过程。应用 Flow-3D 软件建立三维数值水槽-结构模型,水槽长 120 m,宽 10 m,高 12 m,沉箱前后壁(x 向)与水槽入射方向夹角为 0°,三维水槽-结构模型如图 3 所示。

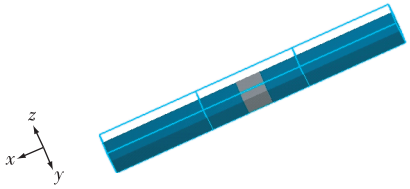


图 3 水槽-结构三维计算模型

Fig. 3 3D numerical model for flume-structure

边界条件及初始条件:水槽边界条件设置如图 4 所示,水槽前端设置造波(Wave)边界,末端设置静水压力(Specified pressure)边界,水槽底面设为壁面(Wall)边界;其余各面均设为对称(Symmetry)边界。初始时刻整个水槽中的初始速度为 0,压强为沿 z 向的静水压强,采用静水水面初始化流场。

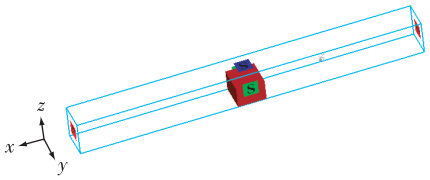


图 4 边界条件示意

Fig. 4 Sketch of boundary conditions

根据事故概况中推算的“莎莉嘉”台风浪的有效波高为 5.0 m,平均周期为 8.8 s 以及设计资料的水深为 7.35 m,将波高、周期和水深输入 Flow-3D 造波系统,可以得到水槽造波如图 5 所示。

图 5 造波图

Fig. 5 Wave generation

计算时间取 5 个波浪周期,计算过程中波浪作用于沉箱上发生越浪现象,如图 6 所示。通过记录作用于沉箱结构面上的波压力时程可获得沉箱所受波浪力。同理,建立了波浪作用方向与 x 方向夹角分别为 30°,60°的三维水槽-结构模型,通过记录波压力时程曲线获得 3 种工况下作用于沉箱上的波浪力,如图 7 所示。从图 7 可以看出,波浪作用方向与 x 方向夹角为 0°,30°,60°的沉箱结构上所受波浪力最大值分别为 2 710,3 427和3 613 kN,最大波浪力发生在第 1 个波峰作用时刻,而后由于波浪发生越浪现象,流体对结构波浪作用力呈现明显的非规则冲击效应;同时可以看出,随着波浪作用方向与 x 向夹角的增大,波浪力逐渐增大,其原因是随着夹角的增大,迎水面面积增大从而导致波浪力增大。

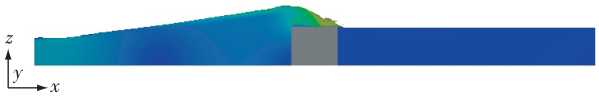


图 6 波浪发生越浪现象

Fig. 6 Overtopping phenomenon

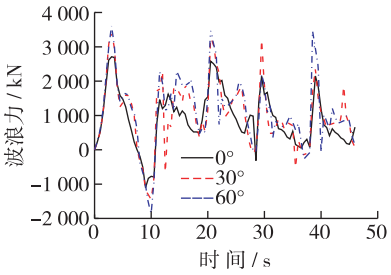


图 7 不同波浪作用与 x 向夹角的波浪力时程曲线

Fig. 7 Wave force time-history curves with different angles between wave direction and x direction

3 “莎莉嘉”台风引起沉箱碰撞破坏分析

3.1 沉箱精细化有限元模型

利用 LS-DYNA 软件建立 2 个沉箱的计算模型,沉箱底面设置刚性地基简化模拟抛石基床基础,如图 8 所示。采用钢筋混凝土分离式模型来模拟钢筋混凝土沉箱结构,沉箱精细化模型中混凝土采用常应力积分实体单元,钢筋采用 Belytschko 梁单元,钢筋和混凝土之间采用共节点的方式模拟,不考虑钢筋混凝土之间的粘结滑移效应,钢筋混凝土沉箱有限元模型如图 9 所示。为了减小计算成本,设定沉箱 B 为刚体,重点分析的沉箱 A 混凝土材料采用损伤本构模型,钢筋采用线性强化本构模型,模型单元尺寸为 70 mm。数值分析发现,进一步细化网格只能够有限地提高计算精度,但计算成本成倍增加,甚至会出现计算机的溢出。

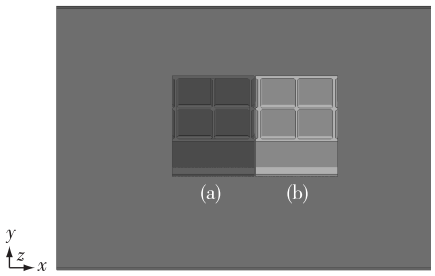


图 8　沉箱整体模型

Fig. 8　Model for caissons

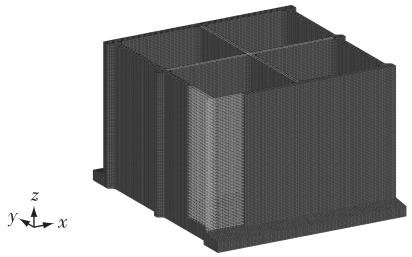


图 9　沉箱精细化有限元模型

Fig. 9　Refined finite element model for caisson

沉箱精细化模型中混凝土材料采用 LS-DYNA 中的 MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 模型，该模型可同时考虑材料的静水压力作用、材料的应变率效应、应力强化效应和材料的残余强度，曾经被成功地用于预测混凝土在冲击荷载作用下单向、双向和三向拉压状态下的响应[12]。同时混凝土材料在碰撞等高加载率荷载作用下，具有显著的应变率效应，其强度可显著提高[13-14]，材料的应变率效应一般通过动力增强系数（Dynamic Increase Factor）来考虑。

混凝土强度的动力增强系数采用 K & C 模型，其抗拉强度的 T_{DIF} 定义[15]为

$$T_{\mathrm{DIF}}=\begin{cases}\dfrac{f_{\mathrm{td}}}{f_{\mathrm{ts}}}=\left(\dfrac{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}}{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{ts}}}\right), & \dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}\leqslant 1\ \mathrm{s}^{-1}\\ \beta\left(\dfrac{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}}{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{ts}}}\right), & \dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}>1\ \mathrm{s}^{-1}\end{cases}\tag{1}$$

式中：f_{td} 为应变率为 $\dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}$ 时混凝土动力抗拉强度；f_{ts} 为应变率为 $\dot{\varepsilon}_{\mathrm{ts}}=10^{-6}\ \mathrm{s}^{-1}$ 时混凝土静力抗拉强度；$\lg\beta=6\delta-2$，其中 $\delta=1/(1+8f'_{\mathrm{c}}/f'_{\mathrm{co}})$，$f'_{\mathrm{co}}=10$ MPa，f'_{c} 为混凝土单轴抗拉强度。

混凝土抗拉强度的 C_{DIF} 定义为

$$C_{\mathrm{DIF}}=\begin{cases}\dfrac{f_{\mathrm{cd}}}{f_{\mathrm{cs}}}=\beta\left(\dfrac{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}}{\dot{\varepsilon}_{\mathrm{cs}}}\right)^{1.026\alpha}, & \dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}\leqslant 30\ \mathrm{s}^{-1}\\ \gamma(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}})^{1/3}, & \dot{\varepsilon}_{\mathrm{d}}>30\ \mathrm{s}^{-1}\end{cases}\tag{2}$$

式中：f_{cd} 为应变率为 $\dot{\varepsilon}_{\mathrm{cd}}$ 时混凝土动力抗压强度；f_{cs} 为应变率为 $\dot{\varepsilon}_{\mathrm{cs}}=30\times10^{-6}\ \mathrm{s}^{-1}$ 时混凝土静力抗压强度；$\lg\gamma=6.156\alpha-0.49$，其中 $\alpha=(5+3f_{\mathrm{cu}}/4)^{-1}$，$f_{\mathrm{cu}}$ 为混凝土静单轴抗压强度。

钢筋采用 LS-DYNA 中的 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 模型，其强度的 F_{DIF} 定义[16]为

$$F_{\mathrm{DIF}}=\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10^{-4}}\right)^{\alpha}\tag{3}$$

$$\alpha=0.074-0.040f_{\mathrm{y}}/414\tag{4}$$

式中：f_{y} 为钢筋屈服强度（MPa）。混凝土和钢筋的材料参数见表 1。

表 1　材料参数

Tab. 1　Material parameters

材料	LS-DYNA 中模型	模型参数及取值
混凝土	MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3	密度2 500 kg/m^3 抗压强度 40 MPa
钢筋	MAT_PLASTIC_KINEMATIC	密度7 850 kg/m^3 弹性模量 206 GPa 泊松比 0.3 屈服强度 400 MPa 强化模量 20.6 GPa

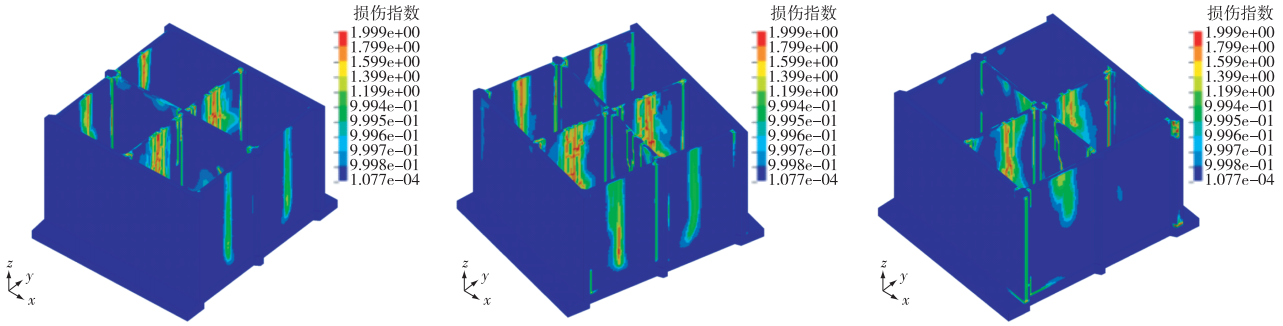
2 个沉箱的碰撞过程需采用接触算法进行模拟,对沉箱与刚性地基间的相互作用以及沉箱间的碰撞反应采用 LS-DYNA 中 CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE,沉箱与地基之间的摩擦系数按文献[17]取 0.6,沉箱间混凝土的摩擦系数按文献[18]取 0.5。

3.2 沉箱碰撞破坏分析

通过记录作用于沉箱的波浪力时程曲线,将所记录的波浪力时程曲线编写成 LS-DYNA 的模型输入文件,并分别按波浪力与 x 向夹角为 0°,30°,60°共 3 种工况施加于所建立的沉箱 B 重心上,模拟波浪入射方向与 x 向成不同夹角时沉箱结构的碰撞反应。

采用上述数值模拟方法模拟了 3 种工况下沉箱的碰撞破坏模式。图 10 给出了波浪作用方向与 x 方向夹角分别为 0°,30°,60°对应 3 种工况 a,b,c 下沉箱的碰撞破坏模式。可见,3 种不同的波浪与沉箱作用方向引起沉箱碰撞破坏模式与破坏程度不尽相同。在工况 a 中,沉箱 B 与沉箱 A 沿 0°发生碰撞,沉箱外壁 *AD* 和 *BC* 发生了严重破坏,在外壁节点处和中部出现了严重的裂缝破损。同时,内隔板 *Oe* 和 *Og* 发生了严重破坏,内隔板 *Of*,*Oh* 未发现明显裂缝破损,内隔板 *g*,*e*,*O* 节点处和板中部出现了严重的裂缝破损。在工况 b 中,沉箱 B 与沉箱 A 沿 30°发生斜向碰撞,沉箱外壁 *AD* 和 *BC* 发生了较为严重的破坏,内隔板 *Oe*,*Og* 发生了严重的裂缝破坏,内隔板 *Of*,*Oh* 也发生了轻微的裂缝破损,其破坏程度较内隔板 *Oe* 和 *Og* 轻,内隔板 *g*,*e*,*O* 节点处和板中部出现了严重的裂缝破损,可以看出内隔板中部和节点处的破损现象与图 2(b)所示破坏模式相近。在工况 c 中,沉箱 B 与沉箱 A 沿 60°发生斜向碰撞,沉箱 4 个外壁的破损程度较小,4 个内隔板的破坏模式与工况 b 相似,但内隔板 *Oe* 和 *Og* 破损程度较工况 b 轻,内隔板 *Of* 和 *Oh* 的破损程度与工况 a 和 b 相比最严重。出现该现象的原因是波浪作用方向与 x 向的夹角就越小,沉箱 B 与沉箱 A 发生碰撞时的夹角就越小,此时内隔板 *Oe* 和 *Og* 所受 x 方向惯性力越大,易引起内隔板中部和端部发生破坏,而此时内隔板 *Of* 和 *Oh* 所受 y 方向的惯性力越小,越不容易发生破损。

综上所述,当波浪作用方向与 x 向夹角为 60°时,沉箱破坏模式与现场检查的结果相近,即沉箱外壁未发生明显破坏,内隔板发生不同程度的裂缝破损。值得注意的是,现场无法获得实际波浪作用与沉箱夹角数据,假定波浪作用方向与 x 向夹角为 0°,30°,60°共 3 种工况进行计算,数值分析表明夹角为 60°时其模拟结果与现场情况相近,但并不代表实际波浪作用方向与沉箱夹角为 60°。



(a) 0° (b) 30° (c) 60°

图 10 沉箱 B 与 A 沿不同角度碰撞的破坏模式

Fig. 10 Pounding damage mode of caissons with different angles between caissons B and A

4 结 语

提出了一种基于台风浪作用下施工期沉箱碰撞反应分析分两步走的数值模拟方法,并将该方法应用于“莎莉嘉”台风引起施工期沉箱碰撞破坏分析研究。通过数值分析,得出如下结论:

(1)所提出的方法可以模拟施工期沉箱在台风浪作用下的碰撞反应,不同波浪作用方向引起沉箱发生不同角度的碰撞会导致沉箱不同的碰撞破坏模式。

(2)所模拟的 3 种工况中波浪作用方向与 x 向夹角成 60°时，沉箱碰撞破坏模式与“莎莉嘉”台风作用期间的现场情况更为接近，沉箱外壁未发生明显破坏，内隔板出现不同程度的裂缝破损。

参 考 文 献：

[1] 李玉成，滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 北京：海洋出版社，2002：121.（LI Yucheng，TENG Bin. Wave action on maritime structures[M]. Beijing：China Ocean Press，2002：121.（in Chinese））

[2] TERRO M J，ABDEL-ROHMAN M，TERRO M J. Wave induced forces in offshore structures using linear and nonlinear forms of Morison's equation[J]. Journal of Vibration and Control，2007，13(2)：139-157.

[3] BAO W G，FUJIHASHI K，KINOSHITA T. Interaction of a submerged elliptic plate with waves[J]. Journal of Hydrodynamics，2010，22(5)：77-82.

[4] 李忠献，黄信. 地震和波浪联合作用下深水桥梁的动力响应[J]. 土木工程学报，2012，45(11)：134-140.（LI Zhongxian，HUANG Xin. Dynamic responses of bridges in deep water under combined earthquake and wave actions[J]. China Civil Engineering Journal，2012，45(11)：134-140.（in Chinese））

[5] JTS 145—2015 港口与航道水文规范[S].（JTS 145—2015 Code of hydrology for harbor and waterway[S].（in Chinese））

[6] GUO Anxin，LI Zhongjun，LI Hui. Point-to-surface pounding of highway bridges with deck rotation subjected to bi-directional earthquake excitations[J]. Journal of Earthquake Engineering，2011，15(2)：274-302.

[7] BI K，HAO H. Numerical simulation of pounding damage to bridge structures under spatially varying ground motions[J]. Engineering Structures，2013，46(1)：62-76.

[8] 丁阳，汪明，李忠献. 爆炸荷载作用下钢框架结构连续倒塌分析[J]. 建筑结构学报，2012，33(2)：78-84.（DING Yang，WANG Ming，LI Zhongxian. Numerical analysis of damage and collapse process of steel frame structures under blast loads[J]. Journal of Building Structures，2012，33(2)：78-84.（in Chinese））

[9] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA user manual[Z]. 2007.

[10] 方钟圣，金承仪. 日本浮标站台风浪波高与风速等参数的统计分析[J]. 船舶力学，2003，7(5)：1-10.（FANG Zhongsheng，JIN Chengyi. Statistical analysis of wave height，wind speed and other parameters due to tropical cyclones in the Northwest Pacific area [J]. Journal of Ship Mechanics，2003，7(5)：1-10.（in Chinese））

[11] 张婷. 波浪的三维数值模拟及其应用[D]. 天津：天津大学，2009.（ZHANG Ting. Three-dimensional numerical simulation of waves and its application[D]. Tianjin：Tianjin University，2009.（in Chinese））

[12] 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.（SHI Yanchao，LI Zhongxian，HAO Hong. Numerical analysis of progressive collapse of reinforced concrete frame under blast loading[J]. Journal of PLA University of Science and Technology，2007，8(6)：652-658.（in Chinese））

[13] MALVAR L J，ROSS C A. A review of strain rate effects for concrete intension[J]. Aci Materials Journal，1998，95(6)：735-739.

[14] BISCHOFF P H，PERRY S H. Compressive behavour of concrete at high strain rates[J]. Materials and Structures，1991，24(6)：425-450.

[15] 师燕超. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的动态响应行为与损伤破坏机理[D]. 天津：天津大学，2009.（SHI Yanchao. Dynamic response and damage mechanism of reinforced concrete structures under blast loading[D]. Tianjin：Tianjin University，2009.（in Chinese））

[16] MALVAR L J. Review of static and dynamic properties of steel reinforcing bars[J]. Aci Materials Journal，1998，95(5)：609-616.

[17] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].（JTS 167-2—2009 Design and construction code for gravity quay[S].（in Chinese））

[18] BI K，HAO H. Numerical simulation of pounding damage to bridge structures under spatially varying ground motions[J]. Engineering Structures，2013，46(1)：62-76.

Pounding damage analysis of caissons during construction under action of storm wave

CHEN Yu, SUN Xiping, LI Yuesong

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

Abstract: The studies and analysis of the pounding damage mode and the mechanism of the caisson during construction under the action of storm waves are carried out based on the pounding damage of the caisson during construction caused by the super typhoon Sarika. In this paper, a new method for the numerical analysis of a structural model is proposed, and is employed to analyze the pounding response of the caissons subjected to the storm wave loads. According to the new method, the simulation process is divided into two steps. In the first step, the wave propagation caused by the typhoon is simulated by the wave-generating tool of Flow-3D, and the time history of the wave force on the caissons is also recorded at the same time. In the second step, a refined finite element model is developed in analyzing the pounding response of the caissons under the action of storm waves, and the wave force time-story curves are applied to the caissons according to the measured data in the first step for further analysis of the structural pounding response using the explicit solver of LSDYNA. The whole simulation of the pounding response of the caissons during construction caused by typhoon Sarika is carried out. The simulated and analysis results show that the different wave direction results in the angle of the caisson collisions, which will lead to different damage modes for the caissons. And when the angle between the wave action direction and the front/back walls of the caisson is 60°, the measured pounding damage mode is in a good agreement with the field situation caused by the typhon Sarika.

Key words: caisson; typhoon; wave; pounding; damage mode