

钢/复材防撞构件冲击试验研究*

蔡德成¹, 甄静水¹, 李博成¹, 闫冀明¹, 余雄飞¹, 王文炜²

(1. 海洋石油工程股份有限公司 天津, 300461)

(2. 东南大学交通学院 南京, 211189)

摘要 为研究钢/复材防撞构件的抗冲击性能,采用波纹钢与复材形成的试件开展冲击试验。试验设置 2 种结构形式和 2 个冲击速度,分析了试件的冲击变形损伤过程,获得了冲击力时程和位移时程曲线,并建立了数值仿真分析模型。结果表明:在冲击荷载作用下,前钢板内部出现 25 cm×20 cm 方形凹坑,背钢板出现不同程度的鼓包;冲击力时程曲线分为加载、相持和卸载 3 个阶段,随着冲击速度增加,无波纹钢试件冲击力峰值的增幅为 65.5%,大于有波纹钢试件的 37.7%,但冲击力持时较短;设置波纹钢提升了试件的刚度,增大了冲击力峰值,同时也增大了背钢板的变形程度,延长了变形发展及恢复的总时长,使得试件产生更大的变形以吸收增加的冲击能。模拟的冲击力峰值及时程曲线与试验值吻合较好,说明建立的数值分析模型可以很好地预测抗冲击性能。

关键词 波纹钢;复材;防撞构件;抗冲击性能

中图分类号 U443.

引言

在船桥碰撞机理研究工作开展的同时,桥梁防撞设施的设计和改进行也得到广泛关注。防撞装置通常采用钢箱,内部填充聚氨酯芯材,外包纤维复合材料(fiber reinforced polymer,简称 FRP)^[1]。防撞设施具有良好的耗能和承载性能,国内外学者对其抗冲击性能开展了相关的研究工作^[2-5]。

在理论分析和结构设计方面,Derueher^[6]将船舶、桥墩、防撞设施三者的接触和撞击视为弹簧质量系统,对碰撞过程中船舶的运动规律和碰撞接触区的结构变形进行了研究。丁德伟^[7]根据重庆嘉陵江黄花园大桥的防撞设计,提出 3 种纤维复合材料(简称复材)防撞浮箱的设计方案,对不同工况中的撞击力进行比较,研究防撞浮箱的变形消能效果。Wang 等^[8]对黏滞性钢丝绳复合吸能防撞设施进行了研究和有效性评价。一些学者采用新材料设计了新型防撞设施^[9-11]。

在试验研究方面,陈国虞等^[12]通过缩小比例的模型试验及仿真模拟,提出柔性消能防撞装置,利用黏滞性钢丝绳复合吸能防撞圈将动能转化为内能,以保护桥梁及船舶。文献[13]在宁波象山白墩大桥进行了防护墩实船碰撞试验,选用排水量为 250~

390 t 的船舶以不同工况撞击柔性防撞装置。Fan 等^[14]提出新型钢-超高性能纤维增强混凝土(ultra-high performance fiber reinforced concrete,简称 UHPFRC)复合材料防撞设施,通过落锤冲击试验和有限元仿真分析评价其抗冲击性能。Zhu 等^[15]提出一种复合材料夹芯结构防撞设施并进行了低速冲击试验,对撞击角度、速度及撞击位置等影响因素进行了研究。Manohar 等^[16]提出一种波纹钢和预制骨料纤维增强混凝土组成的新型复合护舷结构,采用落锤冲击试验研究其冲击行为和失效机理。

现有防撞设施的研究工作主要集中在降低撞击力峰值、延长撞击持续时间及保护桥梁墩柱等方面,然而仍然存在防撞设施冲击试验不充分、抗冲击耗能机理不明晰等不足。笔者给出在防撞设施的内部设置波纹钢以吸收冲击能的结构形式,对防撞设施的缩尺试件开展了冲击试验及数值仿真分析工作。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验共制作了 4 个钢/复材试件,其中 2 个设置了波纹钢,另外 2 个没有设置波纹钢。试件由前、后钢板、钢管骨架、波纹钢、聚氨酯芯材及玻璃纤维

* 龙口南山 LNG 一期工程接收站 EPC 创新咨询资助项目(Z2000LGENT0399)

收稿日期:2023-12-30;修回日期:2024-04-21

复合材料 (glass fiber reinforced polymer, 简称 GFRP) 防护层组成。试件的几何尺寸为 968 mm × 968 mm × 268 mm (长 × 宽 × 厚), 钢面板和方钢管相互焊接形成骨架, 内部填充聚氨酯泡沫作为芯材。钢面板厚度为 6 mm, 钢管骨架厚度为 3 mm。设置波纹钢的防撞构件, 内部均匀分布有 6 个钢板厚度为 6 mm 的波纹钢, 通过焊接的方式与前、后钢面板连接。所有钢材均为 Q235 低碳钢。试件三维图如图 1 所示。试件设计见表 1。

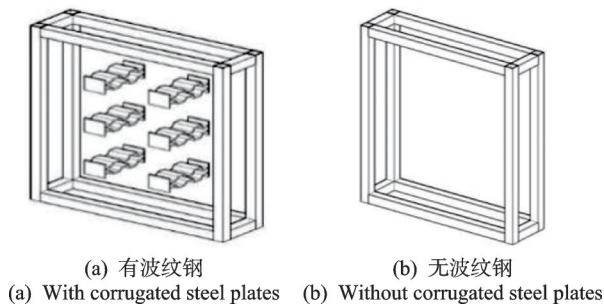


图 1 试件三维图

Fig.1 Three-dimensional view of anti-collision units

表 1 试件设计
Tab.1 Specimen design

编号	试件名称	波纹钢	冲击速度/ (m·s ⁻¹)	摆锤下落 高度/m
1	F-S-3	是	3	0.459
2	F-S-2	是	2	0.204
3	S-3	否	3	0.459
4	S-2	否	2	0.204

试件的制作工序如下: 轧制钢面板、方钢管骨架和波纹钢, 分别进行焊接形成密闭箱体; 聚氨酯芯材通过箱体上预留的小孔采用真空导入一次成型工艺, 在箱体内部发泡并凝胶成型; 封闭小孔后在箱体表面正交覆盖多层 GFRP 材料, 加工防腐涂层。

1.2 试验装置和试验方法

冲击试验装置如图 2 所示, 配备大吨位摆锤, 选取 3 m/s 和 2 m/s 作为预设冲击速度。当预设冲击速度为 3 m/s 时, 摆锤下落预设高度为 0.459 m; 当预设冲击速度为 2 m/s 时, 摆锤下落预设高度为 0.204 m。

摆锤由冲头、固定螺帽、吊臂及若干质量配重块组成。摆锤通过吊臂和固定铰锚固在大型反力架上, 可以绕固定铰进行自由摆动。通过改变配重块数量调整摆锤质量, 摆锤总质量为 1 000 kg。弧形导向滑槽通过螺栓与地面固定, 由弧形钢板对摆锤的运动进行限制, 保证摆锤正向撞击试件。试件支

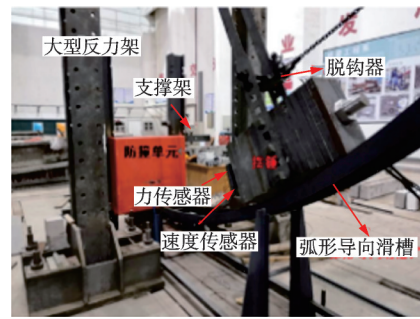


图 2 冲击试验装置
Fig.2 Impact test device

撑架由上水平横撑、下水平横撑、竖向刚架和斜撑组成, 相互之间采用高强螺栓及焊缝连接。上、下水平横撑上预留定位孔, 试件通过螺栓及配套螺帽固定在支撑架上。

数据采集和分析系统为动态信号测试分析系统, 采样频率为 128 kHz, 采样方式为多通道并行同步采样。冲击力时程数据通过安装在摆锤前端的压电式传感器获得。

在试件背钢板布置 LVDT 位移传感器, 记录冲击过程中结构的变形响应。在冲击点处的相应位置设置霍尔磁通量速度传感器, 记录摆锤冲击试件前的瞬时速度。在试验过程中, 采用高速摄像机获取试件在摆锤冲击过程中的结构响应, 图像采集帧率为 1 000 FPS。

图 3 为试件背钢板的位移测点布置。测点 1、测点 2 测定未设置波纹钢位置处的位移情况; 测点 3 设置在中心位置处, 为位移最大的特征点; 测点 4 布置在第 2 排左侧波纹钢的中心处, 测定设置波纹钢位置处的位移情况。

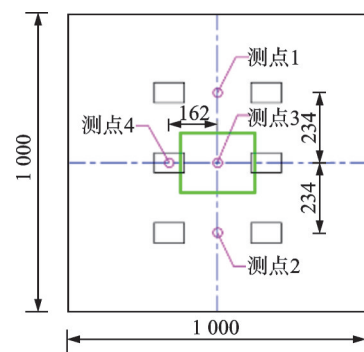


图 3 位移测点布置 (单位: mm)

Fig.3 Displacement measurement point arrangement (unit: mm)

在正式试验前, 进行了冲击预试验, 检查摆锤提升装置、脱钩器、高速摄像机、压电式力传感器、速度传感器、位移传感器与数据采集设备之间的连接情况及数据采集工作情况。

将试件安装到支撑架上后,对传感器与数据采集存储设备的连接及工作状态进行检测。检查完成后,平衡数据采集通道。架设高速摄像机的相关装备,通过高速摄像机对应的控制软件及镜头旋钮调节拍摄范围,控制焦距、感光度及拍摄帧率等相关参数,采用摄影灯调节周边光线,保证拍摄图像的清晰程度。

将摆锤提升至预设冲击速度对应的预设高度,平衡各传感器的采集通道,高速摄像机恢复到待拍摄状态,正式开展摆锤冲击试验。

1.3 材料性能

1.3.1 钢板

参照《金属材料拉伸试验》标准^[17],对防撞构件所使用的钢材进行拉伸试验。实测的钢材拉伸试验装置及应力-应变曲线如图 4 所示。加载方式为等变速率控制,通过万能试验机配套的软件对试验数据进行自动记录,并换算为相应的应力值。将引伸计安装在试件中部测量拉伸应变,通过动静态信号测试分析系统进行采集记录。

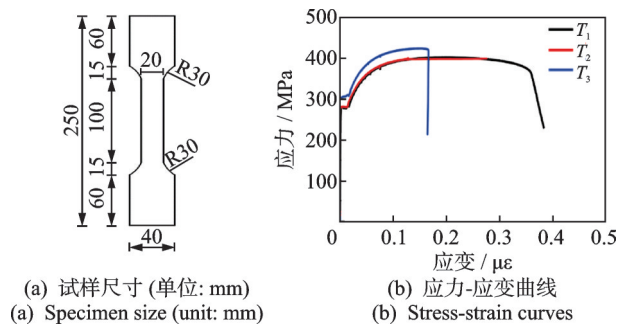


图 4 钢材拉伸试验装置及应力-应变曲线
Fig.4 Steel tensile test apparatus and stress-strain curves

1.3.2 聚氨酯泡沫

参照《软质泡沫聚合材料硬度的测定(压陷法)》标准^[18]的相关要求,对聚氨酯芯材进行压缩试验,其装置及应力-应变曲线见图 5。压缩试验装置为液压

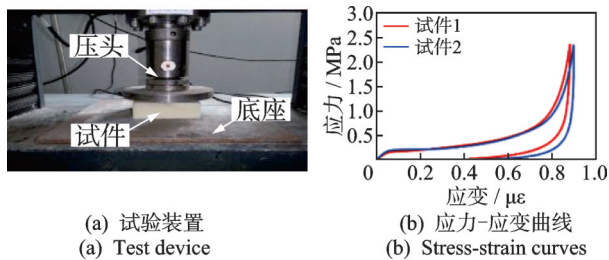


图 5 聚氨酯芯材压缩试验装置及应力-应变曲线
Fig.5 Polyurethane foam compression test device and stress-strain curve

伺服万能材料试验机,传感器量程为 100 kN。压缩试验过程采用等变速率控制荷载,采集系统为动静态信号测试分析系统。

2 试验结果

2.1 试验现象

试件的冲击变形如图 6 所示。由图 6(a)可知:在摆锤冲击作用下,试件前钢板向箱体内部凹陷,产生巨大的碰撞声;摆锤速度逐渐降低为 0,此时前钢板的凹陷达到最大值;随后,试件前钢板带动摆锤向后回弹,回弹至一定位置后,摆锤与前钢板分离,并以一定的速度继续运动;试件被撞击处的防腐涂层破碎并随摆锤飞溅而出,露出内部的 GFRP 防护层;前钢板回弹至一定位置处反复振荡并逐渐停止。冲击结束后,仍能听到试件表面 GFRP 纤维断裂的声音。

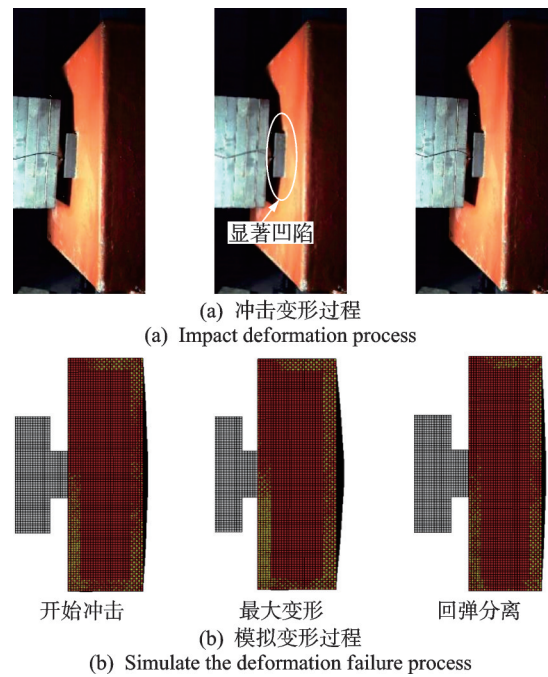


图 6 试件的冲击变形
Fig.6 Impact deformation of specimen

当冲击荷载作用在试件上时,钢板承受冲击力的作用,从而引起钢板的弯曲变形。试件冲击后的变形如图 7 所示。如果冲击力较大或作用时间较长,钢板无法承受过大的冲击力,发生塑性变形,导致钢板凹陷,见图 7(a,b)。同时,通过内部聚氨酯芯材的传力,背面钢板对应摆锤作用位置处出现应力集中现象,导致背面钢板局部区域发生鼓包,见图 7(c)。试件前钢板的方形凹坑长约为 25 cm,宽

约为20 cm,四周防腐涂层破碎,露出GFRP纤维层。试件背钢板除摆锤冲击位置处变形较大外,整体变形相对较小。

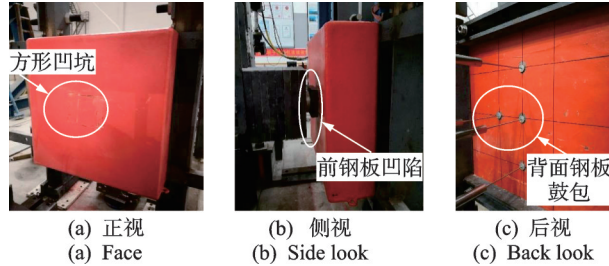


图7 试件冲击后的变形

Fig.7 Deformation of the specimen after impact

2.2 冲击力时程

冲击力时程曲线如图8所示。可以看出,曲线大致可划分为3个阶段:加载阶段(冲击力上升)、相持阶段(冲击力在某个范围波动或出现明显峰值)和卸载阶段(冲击力下降为0)。这3个阶段在图中依次对应1、2和3。

如图8(a,b)所示,试件F-S-3和F-S-2均设有波纹钢,冲击力时程曲线较为相似,加载阶段小幅波动后,相持阶段均出现3个较为明显的波峰,而后进入卸载阶段。试件F-S-3的摆锤速度较大,冲击力峰值为147.6 kN,较试件F-S-2的冲击力峰值107.2 kN增大了37.69%,而冲击力持时减少2 ms。对于未设波纹钢的试件S-3和S-2,加载阶段出现小幅波动,相持阶段较为平稳,没有明显的波峰出现,曲线存在轻微振荡,如图8(c,d)所示。试件S-3的

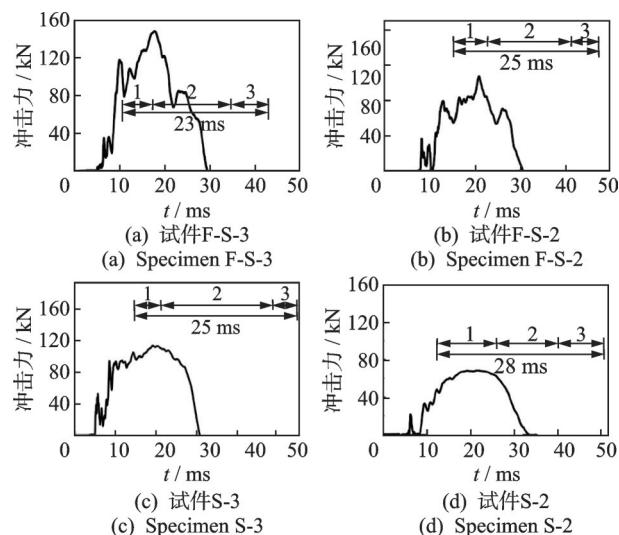


图8 冲击力时程曲线

Fig.8 The impact force time history curves

冲击力峰值为112.7 kN,较试件S-2的冲击力峰值68.1 kN增大了44.6 kN,增幅为65.5%,冲击力持时较短。对比可知,提升摆锤冲击速度可以明显增加冲击力峰值,设置波纹钢的试件冲击力时程曲线波峰更为明显,而未设波纹钢的试件冲击力时程曲线相对平稳。

由图8(a,c)可以看出,速度同为3 m/s的试件S-3和F-S-3,冲击力峰值分别为112.7 kN和147.6 kN,有波纹钢的试件增大了31.0%,但试件S-3的冲击力持时较试件F-S-3延长2 ms。由图8(b,d)可以看出,在速度同为2 m/s时,试件F-S-2的冲击力峰值为107.2 kN,较试件S-2的冲击力峰值68.1 kN增幅为57.4%,持时也相对延长3 ms。由此可知,试件具有良好的缓冲吸能效果,能够平缓冲击力的上升趋势并延长冲击力的持时。

加载阶段均出现小幅波动的原因是因为试验中摆锤与前钢板的碰撞接触及支撑部件对试件约束不够牢固。摆锤平面与钢板平面难以做到绝对平整,冲击时存在接触面贴合过程。支撑架的四边支承部件与试件之间存在微小缝隙,在冲击过程中缝隙闭合消耗冲击能量,造成冲击力时程曲线在上升阶段的波动。波纹钢在受冲击过程中褶皱逐渐压缩耗能,是试件F-S-3和F-S-2在相持阶段出现波峰的原因。试件S-3和S-2不设波纹钢,由钢板弯曲和聚氨酯芯材压缩变形达到吸能的目的,冲击力时程曲线在相持阶段较为平稳。聚氨酯芯材内部孔隙在受冲击过程中压缩闭合,消耗冲击能,使得试件S-3和S-2的冲击力时程曲线出现小幅振荡现象。

2.3 位移时程

位移时程曲线如图9所示。限于篇幅,图9中仅给出了测点3(中心点)的位移时程曲线。由图可知,位移时程曲线大致可划分为3个阶段:上升阶段(位移由0上升至峰值)、下降阶段(位移由峰值下降至谷值)和振动阶段(位移在一定范围内振荡)。各工况中测点3位移峰值最大,测点4的位移峰值次之。各测点位移峰值见表2。

以测点3为例,当速度相同而在内部中设置波纹钢,试件F-S-3的位移峰值较试件S-3增加了12.5 mm,试件F-S-2的位移峰值较试件S-2增加了9.5 mm,设置波纹钢的工况在上升阶段和下降阶段的冲击时长大于不设波纹钢的工况,说明波纹钢的设置增大了背面钢板的变形程度,延长了变形发展

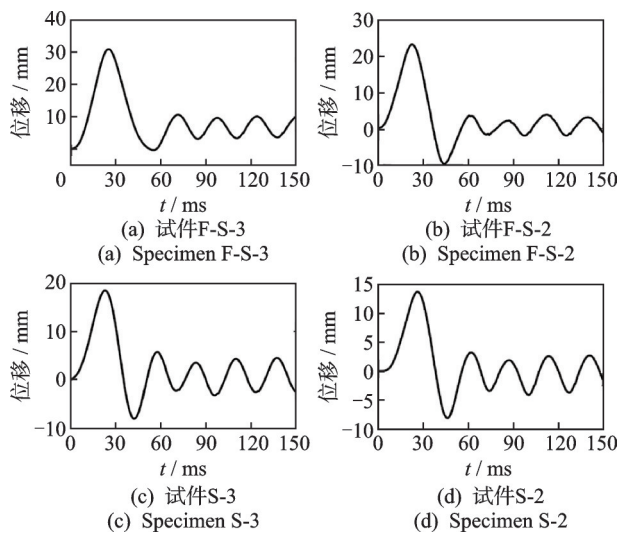


图9 位移时程曲线

Fig.9 Displacement time history curves

表2 各测点位移峰值

Tab.2 The peak displacement of each measurement point

试件编号	位移峰值/mm			
	测点1	测点2	测点3	测点4
F-S-3	24.1	20.1	30.7	26.2
F-S-2	19.5	16.4	23.0	20.5
S-3	14.6	12.9	18.3	18.0
S-2	11.9	9.9	13.5	12.2

及恢复的总时长。当结构完全相同而冲击速度由 2 m/s 提升至 3 m/s 时,试件 F-S-3 与 F-S-2 相比,测点 3 位移峰值提升了 33.3%。没有设置波纹钢的试件 S-3 与 S-2 相比,测点 3 位移峰值提升了 34.9%,说明冲击速度的提升使得试件产生更大的变形,以吸收增加的冲击能。

比较不同测点的位移峰值差值可知,设置波纹钢的试件 F-S-3 的测点 1 和测点 3 的位移峰值差值明显大于未设置波纹钢的试件 S-3,测点 3 和测点 4 情况相同。类似的差值在试件 F-S-2 和 S-2 中同样存在。由此可知,速度相同时,设置波纹钢试件背面钢板产生更大的突出变形,吸收冲击能更加充分。

综上所述,在一定的冲击荷载作用下,与没有设置波纹钢试件相比,波纹钢产生压缩变形,起到了吸能、耗能的目的。随着冲击荷载的增大,波纹钢逐渐由弹性压缩变形转变为塑性压缩变形,可以耗散更多的能量,增加结构的吸能能力,有效提高抗冲击性能。

3 数值仿真分析

3.1 模型与材料参数

利用有限元软件^[19]对摆锤和试件建立分析模型,如图 10 所示。为简化计算,建模过程中没有考虑钢板间的焊缝、试件与支撑架的连接情况。不同材料形成的部件间共用节点进行模拟。

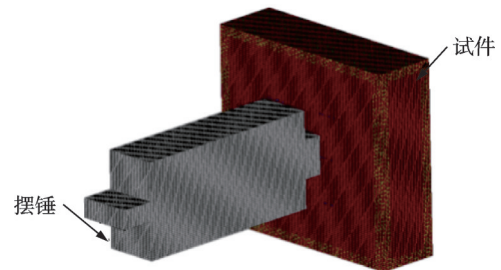


图10 有限元分析模型

Fig.10 Finite element analysis model

摆锤、聚氨酯芯材和波纹钢均采用六面体 solid (实体)单元,网格尺寸为 10 mm。钢板和 GFRP 防护层使用 shell(壳)单元,网格尺寸为 10 mm。

由于摆锤装置刚度远大于防撞构件,冲击过程中基本不发生变形,为简化建模,赋予摆锤装置刚性特性,接触刚度参数设置与钢材相同,对接触进行设定,赋予摆锤初速度以施加冲击荷载。试验中通过霍尔速度传感器测得的摆锤冲击前瞬时速度见表 3。各工况的摆锤初始速度采用试验中实际测得的瞬时速度数据。

表3 试验中摆锤冲击前瞬时速度

Tab.3 The instantaneous velocity of the pendulum before impact in the test

试件	瞬时速度/(m·s ⁻¹)	试件	瞬时速度/(m·s ⁻¹)
F-S-3	3.125	F-S-2	2.174
S-3	2.941	S-2	2.083

钢材的材料模型选用多线段弹塑性材料本构模型,在该模型中用户需要输入材料的真实应力-有效塑性应变数据。由材料性能测试获得的应力-应变曲线需转化为真实应力-有效塑性应变关系曲线。文献[20-22]提出了一种材料试验数据的转化方法,以颈缩现象为分界点,将真实应力-应变曲线分为两部分,分别按下面公式进行计算。

材料颈缩前

$$\sigma_i = \sigma_e(\epsilon_e + 1) \quad (1)$$

$$\epsilon_t = \ln(\epsilon_e + 1) \quad (2)$$

材料颈缩后

$$\sigma_t = C\epsilon_t^n \quad (3)$$

$$n = \ln(1 + A_g) \quad (4)$$

$$C = R_m \left(\frac{e}{n}\right)^n \quad (5)$$

$$A_g = \frac{1}{(0.24 + 0.01395R_m)} \quad (6)$$

其中; σ_e 为拉伸应力; ϵ_e 为拉伸应变; σ_t 为真实应力; ϵ_t 为有效塑性应变; R_m 为拉伸极限强度; e 为自然常数; C, A_g 为转换参数。

利用式(1)~(6),将钢材拉伸试验中得到的应力-应变关系转换为真实应力-有效塑性应变关系,用于数值模型中材料的参数输入。钢板的真实应力-有效塑性应变曲线如图 11 所示。

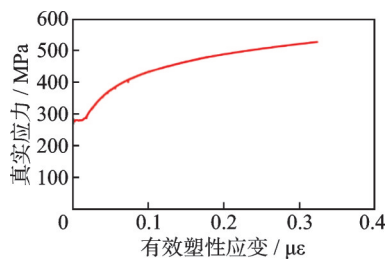


图 11 钢板的真实应力-有效塑性应变曲线

Fig.11 The true stress-effective plastic strain curve of the steel plate

选用 Cowper-Symonds 模型^[23-24],钢材在冲击过程中的应变率效应为

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_{y0} + \beta E_p \epsilon_{eff}^b) \quad (7)$$

$$E_p = \frac{E_{tan} E_p}{E - E_{tan}} \quad (8)$$

其中: $\dot{\epsilon}$ 为应变率; σ_{y0} 为初始屈服应力; ϵ_{eff}^b 为有效塑性应变; σ_y 为对应应变率的应力值; E_p 为塑性硬化模量; E_{tan} 为切线模量; E 为弹性模量; C, p 为模型参数, $C = 40.4, p = 5$ ^[24]。

根据试验中聚氨酯芯材的材料特性并结合相关仿真研究结果^[25-26],选用压缩性强的低密度芯材模型作为聚氨酯芯材的材料模型,将压缩试验中得到的聚氨酯芯材应力-应变曲线导入模型中。选用复合材料本构模型作为 GFRP 材料模型。参考生产厂家提供的材料性能及文献[15]中的参数取值,输入相关参数值。材料参数如表 4 所示。

表 4 材料参数

Tab.4 Material parameters

材料	参数	取值
聚氨酯	密度/(kg·m ⁻³)	40
	弹性模量/MPa	2.5
	屈服强度	0.16
GFRP	密度/(kg·m ⁻³)	40
	弹性模量/MPa	2.75
	泊松比	0.16
	剪切模量/MPa	8 800
	剪切应力系数	0.7
	最大拉应变/με	0.014
	最大压应变/με	0.008
	最大剪应变/με	0.1
	剪切强度/MPa	42.18
	压缩强度/MPa	168.21
	拉伸强度/MPa	291.60

3.2 数值模拟结果

3.2.1 变形

有限元模拟的变形破坏过程见图 6(b)。随着摆锤的冲击,试件前钢板向内凹陷,后钢板出现明显鼓包。摆锤冲击速度逐渐下降,达到一定深度后,摆锤速度降低至 0,在前钢板的带动下向后回弹,并最终与试件分离。试件的前钢板在一定位置处反复振荡并逐渐停止。

3.2.2 冲击力时程

提取有限元模型中压电式力传感器所在界面的冲击接触力时程曲线,与试验中传感器得到的冲击力时程曲线进行比较,如图 12 所示。可以看出,模拟的冲击力时程曲线与试验曲线走势基本一致。试

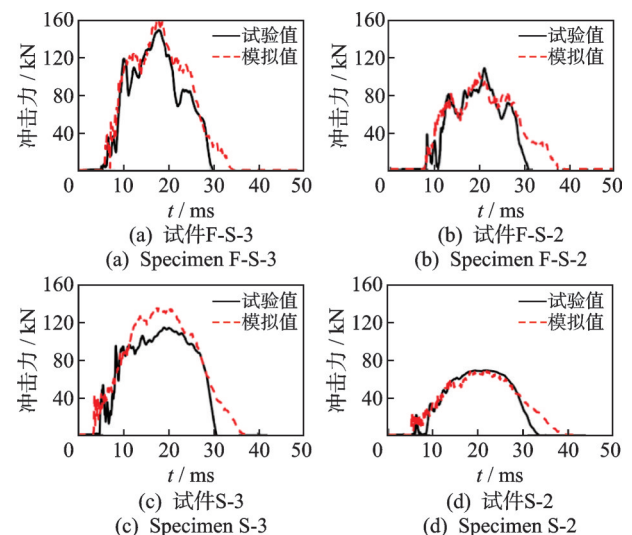


图 12 冲击力时程曲线对比

Fig.12 Comparison of impact force time history curves

件F-S-3和F-S-2的冲击过程相持阶段出现3个明显波峰;试件S-3和S-2中的模拟曲线在相持阶段没有出现明显波峰,曲线轻微振荡。上述特征与试验得到冲击力时程曲线基本相同。

冲击力峰值方面,模拟的冲击力峰值与试验值较为接近,除试件S-3外,冲击力峰值的模拟结果与试验数据差值均在8%以内。试件S-3的模拟冲击力峰值与试验值差值相对较大,为21.7 kN。其原因是防撞构件支撑架的固定装置出现松动,在摆锤冲击试验过程中支撑架存在轻微晃动,冲击力峰值有所降低。支撑架紧固后,试件S-2没有出现类似现象。

在冲击力持时方面,模拟值与试验值存在差别,模拟冲击力持时均大于试验的持时。这是因为有限元模型中是理想的完全约束,摆锤与钢面板之间是完全正向接触。在冲击试验中,支撑架刚度是有限的,不是完全约束,摆锤与钢面板不是均匀接触,存在逐渐贴合的过程。

3.2.3 位移时程

位移时程曲线模拟如图13所示。可以看出,模拟位移时程曲线与试验曲线走势基本一致,同样可以划分为上升阶段、下降阶段和振动阶段。模拟位移峰值与试验值较为接近。在冲击后的振荡阶段,试验曲线和模拟曲线都在残余值上下波动,模拟曲线的振动频率略大于试验曲线,其原因是两者之间的边界条件差别及模型中的假定。在进行撞击试验时,冲击荷载间接作用在支撑架上,支撑架刚度有限,试验中试件发生了轻微挠动和回弹,因此实测到了-10 mm位移。

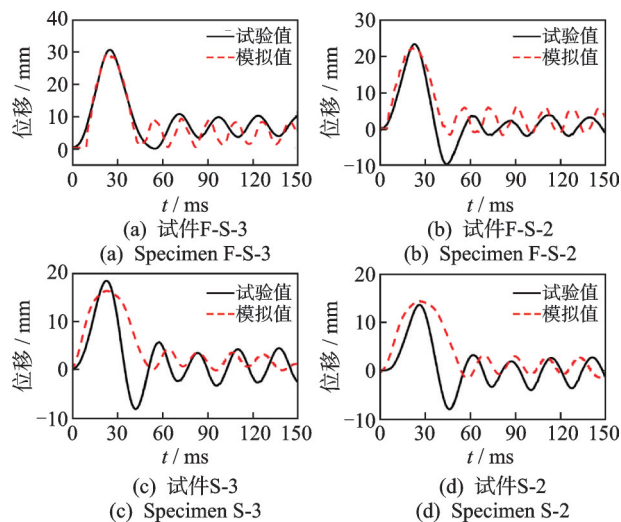


图13 位移时程曲线模拟

Fig.13 Simulation of displacement time history curves

4 结论

1) 在冲击荷载作用下,试件前钢板随着摆锤的运动而向箱体内部凹陷为25 cm×20 cm的方形凹坑,摆锤速度逐渐降低为0,向后回弹至一定位置后,摆锤与试件前钢板分离,前钢板回弹至一定位置处反复振荡并逐渐停止,背钢板出现不同程度的鼓包。

2) 冲击力时程曲线分为加载阶段、相持阶段和卸载阶段3个过程。摆锤冲击速度由2 m/s增加至3 m/s,冲击力峰值有所增加,持时较短。无波纹钢试件冲击力峰值增幅大于有波纹钢试件冲击力峰值增幅,但是冲击力持时较短。设置波纹钢提升了试件的刚度,冲击力峰值较无波纹钢的试件明显增大,3 m/s的撞击速度下增大了31.0%,2 m/s的撞击速度下增大了57.4%。

3) 波纹钢的设置增大了背钢板的变形程度,延长了变形发展及恢复的总时长。2种速度下设置波纹钢的位移峰值分别增加了12.5 mm和9.5 mm,上升阶段和下降阶段的总时长有所增大。随着冲击速度的增加,有波纹钢和无波纹钢的位移峰值均有所提升,使得试件产生更大的变形以吸收增加的冲击能。

4) 模拟的冲击力峰值、冲击力时程曲线及位移时程曲线与试验值吻合较好,建立的数值分析模型可以很好地预测试件的抗冲击性能。

参 考 文 献

- [1] 赵少伟,何聪岩,胡霖嵩,等.基于安全储备指标的预应力FRP加固设计方法[J].河北工业大学学报,2023,52(5):68-76.
ZHAO Shaowei, HE Congyan, HU Linsong, et al. Prestressed FRP reinforcement design method based on safety reserve index[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2023, 52(5): 68-76. (in Chinese)
- [2] 韩娟,方海,刘伟庆,等.桥墩防船舶撞击研究概述[J].公路,2013(10):60-66.
HAN Juan, FANG Hai, LIU Weiqing, et al. Review of studies on ship collisions on piers[J]. Highway, 2013(10): 60-66. (in Chinese)
- [3] SHA Y, HAO H. Laboratory tests and numerical simulations of barge impact on circular reinforced concrete piers[J]. Engineering Structures, 2013, 46: 593-605.
- [4] 梁文娟.船舶碰撞的三维分析[J].上海船舶运输科学研究所学报,1986(1):80-93.
LIANG Wenjuan. Three-dimensional analysis of ship/ship collision[J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 1986(1): 80-93. (in Chinese)
- [5] 刘建成,顾永宁.基于整船整桥模型的船桥碰撞数值

- 仿真[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 155-162.
- LIU Jiancheng, GU Yongning. Simulation of ship-bridge head-on collision based on finite element model of whole ship-bridge [J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(5): 155-162. (in Chinese)
- [6] DERUEHER K N. Analysis of concrete bridge piers for vessel impact [C]//Proceeding of Sino-American Symposium on Bridge and Structural Engineering. Hoboken, USA: Stevens institute of Technology, 1982: 393-420.
- [7] 丁德伟. 重庆嘉陵江黄花园大桥FRP防撞浮箱设计及仿真分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [8] WANG J J, SONG Y C, WANG W, et al. Evaluation of flexible floating anti-collision device subjected to ship impact using finite-element method[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 178: 321-330.
- [9] ZHOU L, LI H, WEI J, et al. Design and simulation analysis of a new type of assembled UHPC collision avoidance[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(13): 4555.
- [10] SHAN C L. Analysis of collision performance of anticollision box made of steel - polyurethane sandwich plates [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 175: 106357.
- [11] WANG W, MORGENTHAL G, KRAUS M. Numerical evaluation of a novel crashworthy device for pier protection from barge impact[J]. *Engineering Structures*, 2020, 212: 110535.
- [12] 陈国虞, 王礼立. 桥梁防撞理论和防撞装置设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 22-30.
- [13] 刘军, 吕忠达, 徐爱敏, 等. 桥梁柔性防船撞装置设计的关键技术研究[C]//第二十届全国桥梁学术会议论文集(下册). 武汉, 中国: 中国土木工程学会桥梁及结构工程分会, 2012: 1181-1187.
- [14] FAN W, GUO W, SUN Y, et al. Experimental and numerical investigations of a novel steel-UHPFRC composite fender for bridge protection in vessel collisions[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 165: 1-21.
- [15] ZHU L, LIU W Q, FANG H, et al. Design and simulation of innovative foam-filled lattice composite bumper system for bridge protection in ship collisions [J]. *Composites :Part B*, 2019, 157: 24-35.
- [16] MANOHAR T, SURIBABU C R, MURALI G, et al. A novel steel-PAFRC composite fender for bridge pier protection under low velocity vessel impacts [J]. *Structures*, 2020, 26: 765-777.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 228.1—2010 金属材料拉伸试验第1部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 10807—2006 软质泡沫
- 聚合材料硬度的测定(压陷法)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [19] 焦楚杰, 李习波, 郑晨. 活性粉末混凝土SHPB试验的数值仿真[J]. *河北工业大学学报*, 2014, 43(6): 66-68.
- JIAO Chujie, LI Xibo, JIA Chen. Numerical simulation of SHPB experiments of reactive powder concrete [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2014, 43(6): 66-68. (in Chinese)
- [20] GETTER D J, KANTRALES G C, CONSOLAZIO G R, et al. Strain rate sensitive steel constitutive models for finite element analysis of vessel-structure impacts[J]. *Marine Structures*, 2015, 44: 171-202.
- [21] VILLAVICENCIO R, LIU B, GUEDES-SOARES C. Experimental and numerical analysis of a tanker side panel laterally punched by a knife edge indenter [J]. *Marine Structures*, 2014, 37: 173-202.
- [22] VILLAVICENCIO R, SOARES C G. Numerical plastic response and failure of a pre-notched transversely impacted beam [J]. *Ships and Offshore Structures*, 2012, 7(4): 417-429.
- [23] HASSAN A, OUDAH F. RF-DYNA : software for optimized random finite element simulation using LS-DYNA [J]. *Advances in Engineering Software*, 2024, 196: 103724.
- [24] COWPER G R, SYMONDS P S. Similarity law of global and local responses of reinforced concrete beams subjected to impact loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 194: 105085.
- [25] 游国忠, 葛如海, 程勇, 等. 轿车车门侧面碰撞有限元模拟[J]. *中国公路学报*, 2006, 19(5): 119-122.
- YOU Guozhong, GE Ruhai, CHENG Yong, et al. Finite element simulation for car door side crash [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2006, 19(5): 119-122. (in Chinese)
- [26] HU H Q, ZHANG W, CHENG J Y, et al. Multifunctional crystalline hydrogel with a multistage porous structure inspired by biomineralization and ostwald ripening process: high elasticity, low hysteresis, and excellent sensing properties[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 500: 156601.



第一作者简介:蔡德成,男,1984年6月生,高级工程师。主要研究方向为新材料在工程中的应用。

E-mail: caidecheng26@cnooc.com.cn