

中空夹层金属管混凝土构件侧向冲击试验研究*

石 岩^{1,3}, 李宣莹^{2,3}, 张君博², 刘菲菲², 张纪刚^{2,3}

(1. 福建工程学院土木工程学院 福州, 350118) (2. 青岛理工大学土木工程学院 青岛, 266033)

(3. 山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心 青岛, 266033)

摘要 为提高海洋平台结构的抗冰能力, 提出一种新型中空夹层金属管混凝土导管腿构件。通过理论分析、数值模拟和试验相结合, 研究不同外钢管材料(Q345 钢、奥氏体 304 级不锈钢和 T6061 铝合金)对中空夹层钢管混凝土构件的影响。通过单次冲击和连续冲击两种加载方式进行加载, 并与钢质空心导管腿进行对比, 试验结果发现: 组合构件抗冲击性能优于空管构件, 铝合金组合构件整体抗冲击能力较差, 不锈钢单次冲击作用下极限承载能量高达 18.83 kJ 以上, 小能量连续冲击作用下承载冲击次数最多, 不锈钢组合构件抗冲击力学性能最好。结合有限元 ABAQUS 软件, 对单次冲击构件建模并得出计算结果, 与试验结果基本吻合。

关键词 海洋平台; 中空夹层金属管混凝土; 导管腿; 抗冲击性能

中图分类号 TU398; TH113

引 言

中空夹层钢管混凝土是基于传统的钢管混凝土发展而来的, 它是将内、外两层钢管同心放置, 往钢管之间浇灌混凝土而形成的新型组合结构。这种构件除了具有承载能力高、耐火性能良好以及施工方便等优点, 同时因为填充混凝土分别受到外钢管的套箍作用和内钢管的支撑作用, 使得构件整体具有抗弯刚度大、侧向变形小及自重轻的独特优势。在海冰覆盖的海洋环境中, 采用中空夹层钢管混凝土构件作为导管架海洋平台结构中的导管腿, 能够大大增加结构遭受冰荷载作用时的可靠性与安全性^[1]。

目前, 中空夹层钢管混凝土构件在冲击荷载下的力学性能已经有了一些进展工作。王洪欣等^[2]在落锤试验机上对 4 根中空夹层钢管混凝土构件进行冲击试验, 研究参数包括落锤高度和试件空心率。曹浩煜^[3]以中空夹层钢管混凝土柱为研究对象, 利用试验以及有限元分析侧向撞击下构件的力学性能。Wang 等^[4]对外包纤维增强复合材料的中空夹层钢管混凝土组合构件的抗冲击性能进行了试验研究。Aghdamy 等^[5]采用 ANSYS/LS-DYNA 软件

中的显式分析模块模拟预加轴力的中空夹层钢管混凝土柱的侧向冲击过程和柱的破坏模式。辜应卓^[6]采用数值分析的方法, 建立高强钢和普通钢圆套圆中空夹层钢管混凝土构件的侧向冲击有限元模型。文献^[7-8]对高层或超高层中底层不锈钢-混凝土-钢管组合构件在两端固定情况下受到横向冲击的力学性能进行了研究。可以看出, 对构件的动力性能研究多针对同种材料和单次冲击。

笔者提出新型中空夹层金属管混凝土导管腿来代替原导管架式海洋平台的空心钢制导管腿, 外管分别为 Q345 钢、奥氏体 304 级不锈钢和 T6061 铝合金材质, 冲击形式分别为单次冲击和连续冲击, 研究构件受到横向冲击的动态响应, 并与空管金属构件进行对比。最后, 基于有限元 ABAQUS 对单次冲击构件的试验数据进行了对比验证。

1 试验概况

1.1 构件信息及性能

本次冲击试验共设计了 16 根构件, 包括 11 根组合构件和 5 根空管构件, 其中, 组合构件截面采用圆套圆形式, 构件信息如表 1、表 2 所示。外管径和内管径分别为 114 和 50 mm, 壁厚分别为 3 和

* 福建省教育厅资助项目(JAT170381); 国家自然科学基金资助项目(51678321)
收稿日期: 2020-01-17; 修回日期: 2020-04-25

2.5 mm,填充混凝土为 C40 级,构件两端各约束 150 mm。外管材质包含 Q345 钢、奥氏体 304 级不锈钢和 T6061 铝合金,内管材质均为 Q345 钢。

表 1 单次冲击构件信息表

Tab. 1 The components under single impact load

编号	构件尺寸/mm		落锤		冲击能/kJ
	总长	有效长度	高度/m	质量/kg	
LV-1	1 500	1 200	1.0	427	4.18
LV-3	1 500	1 200	3.0	427	12.55
CS-3.5	1 500	1 200	3.5	427	14.65
CS-4	1 500	1 200	4.0	427	16.74
SS-3.5	1 500	1 200	3.5	427	14.65
SS-4	1 500	1 200	4.0	427	16.74
SS-4.5	1 500	1 200	4.5	427	18.83
* HLV-3	1 500	1 200	3.0	427	12.55
* HCS-2.5	1 500	1 200	2.5	427	10.46
* HCS-3	1 500	1 200	3.0	427	12.55
* HSS-2.5	1 500	1 200	2.5	427	10.46
* HSS-3	1 500	1 200 </td <td>3.0</td> <td>427</td> <td>12.55</td>	3.0	427	12.55

LV 为铝合金组合构件;CS 为普通钢组合构件;SS 为不锈钢组合构件;数字代表冲击高度;带 * 构件为空管构件

表 2 连续冲击构件信息表

Tab. 2 The components under continuous impact load

编号	构件尺寸/mm		落锤		冲击能/kJ
	总长	有效长度	高度/m	质量/kg	
CS-2.5	1 500	1 200	2.5	427	10.46
CS-3	1 500	1 200	3.0	427	12.55
SS-2.5	1 500	1 200	2.5	427	10.46
SS-3	1 500	1 200	3.0	427	12.55

CS 为普通钢组合构件;SS 为不锈钢组合构件;数字代表冲击高度

构件中所用的内、外管的具体力学性能参数见表 3,浇筑混凝土之前先将钢管一侧焊上 200 mm×200 mm×10 mm 的端板,浇筑过程中借助插入式振捣棒对混凝土分层振捣,振捣完毕的构件放在室外洒水养护 28 天。

表 3 钢管力学性能参数表

Tab. 3 Mechanical properties of steel tube

材料类型	厚度/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
不锈钢	3.0	233.5	740.4	126.6	78.9
铝合金	3.0	281.3	323.5	68.6	32.5
Q345	3.0	333.0	497.8	208.0	39.4
Q345	2.5	265.2	443.8	161.4	38.6

1.2 试验装置

冲击试验是利用哈尔滨工业大学的重力式落锤

冲击试验机完成,试验装置如图 1 所示。落锤质量为 427 kg,由控制平台操作提升、定位与释放,重力势能转化为动能对构件实现冲击过程。

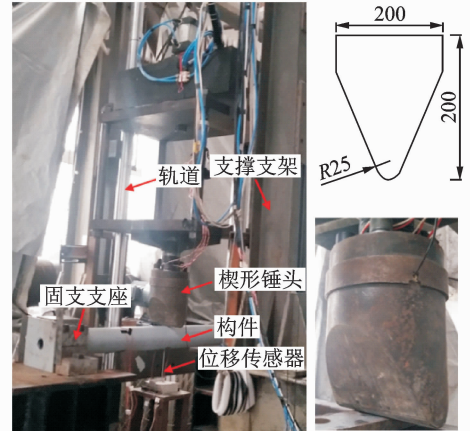


图 1 试验装置和锤头尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Test device and hammer dimensions (unit:mm)

本次冲击试验的边界条件均设计为两端固定,每端设计上、下 2 个钢支座,中间用 4 只 8.8 级 M24 的高强螺栓固定连接,下支座再与试验底座牢固连接,保证构件不会发生滑移情况。

1.3 试验主要测试内容

本次冲击试验测试的内容主要包括:冲击力 (F) 时程曲线,通过固定在锤头上的压电式力传感器进行测量;构件跨中底部残余挠度 (Δ_0),采用动态位移传感器测量;外管表面应变 (ϵ) 时程曲线,选用电阻式应变片布置在相应测点,监测构件外管纵向应变时程曲线;构件冲击全过程通过 Phantom V310 高速摄像机进行记录。

2 试验结果分析

2.1 冲击过程

图 2 为高速摄像机记录到的构件(SS-3)冲击全过程。可以看到,从触发落锤到冲击结束的整个过程可以被分解为几个阶段:①落锤释放,重力势能转化为动能;②落锤第 1 次与构件发生接触;③构件获得初速度与落锤一起向下运动,并且速度不断降低;④落锤与构件速度降为零,两者之间相对静止,此时跨中挠度达到最大值;⑤构件开始回弹,同时与落锤以同样的速度向上运动;⑥能量耗尽,落锤最终静止在构件表面,代表整个冲击过程结束。

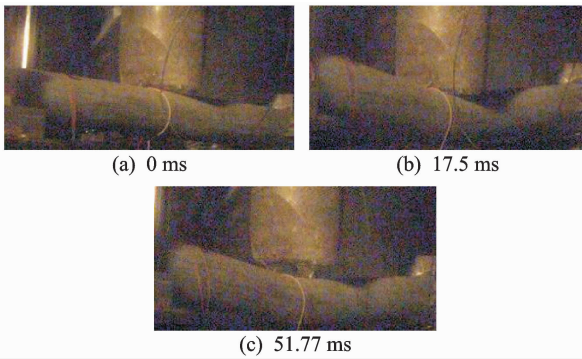


图2 冲击试验全过程

Fig. 2 The process of impact test

2.2 冲击力时程曲线

2.2.1 单次冲击的冲击力时程曲线

以图3(f)为例观察冲击力时程曲线,组合构件的整个冲击过程分为峰值段、调整段、平台段及卸载段等几个阶段;而空管构件的曲线走势出现了极大差别,曲线变化缓慢并且没有出现峰值阶段。可以说明:组合构件相较于空管构件,由于内部混凝土的填充,极大地增强了构件局部变形的刚度;钢管对混凝土的约束作用使得混凝土处于三向受力状态,混凝土强度有所提高,组合构件耗能能力明显优于空管构件。

由于传感器测量故障,导致CS-3构件数据缺失;另外HLV-3构件因冲击能量过大外管发生撕裂,所以取前半段有效数据。观察图3(a),(e)中LV-1和CS-4构件的曲线走势并结合高速摄像机对全过程的记录,判断曲线中出现了2个平台段:冲击能量过大,构件在第1个平台段结束时外管出现开裂损伤;冲击力瞬间卸载后由于内部混凝土仍能提供一定的抗冲击能力,使得出现第2个平台段来延缓构件的破坏。

平台段是冲击过程中主要的耗能阶段,观察组合构件在相同的冲击能量下,外管材质从铝合金到不锈钢再到Q345钢,平台值越来越大,冲击持续时间越来越短。其中,铝合金组合构件在1 m高度作用下外管即发生破坏,相较于其他2种材质起始高度为2.5 m时没有出现开裂现象,铝合金组合构件的整体抗冲击性能较弱。结合图3与表3中金属材料力学性能参数,判断普通钢与不锈钢的差异性与屈服强度有关。因为冲击属于瞬时荷载,变形与损伤在瞬间完成,但是不锈钢组合构件一直承受受到冲击高度为4.5 m时依然没有出现外观损伤,良好的延伸率使其抗冲击潜力巨大。从冲击能量的角度,以构件外观没有出现明显损伤为标准,判断铝合金、

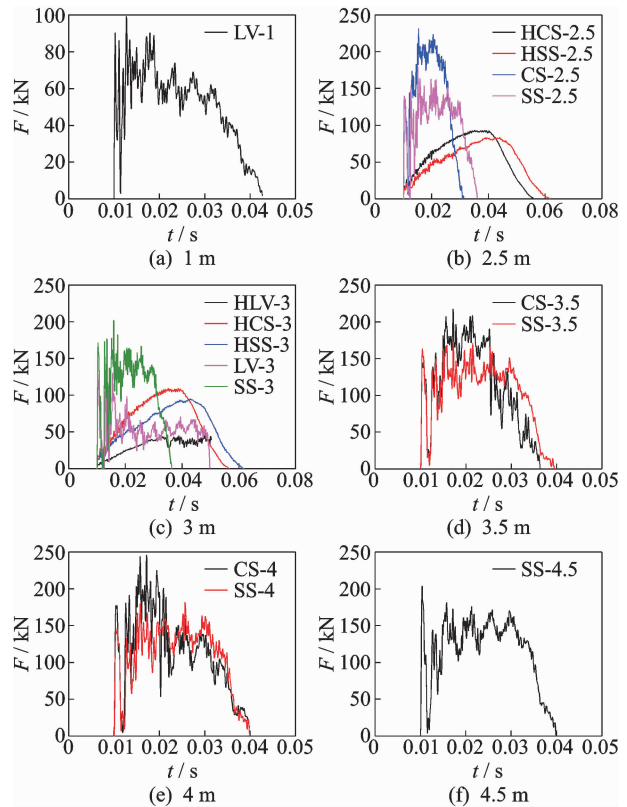


图3 不同冲击高度下构件冲击力时程曲线

Fig. 3 Time history curves of members under different impact heights

普通钢及不锈钢组合构件的承受极限分别为4.18 kJ以下、12.55~14.65 kJ之间以及18.83 kJ以上。

2.2.2 连续冲击的冲击力时程曲线

连续冲击,即保证每次落锤质量与高度皆不变,对构件进行多次冲击。构件在实际工作中很小概率会因为1次大能量冲击而受到严重破坏,绝大多数是遭受小能量的多次冲击使得构件中损伤与裂纹不断积累与扩展,小能量的多次冲击也是判断构件抗冲击性能优劣的形式之一。笔者对冲击高度分别为2.5与3 m的构件采取连续冲击的形式,试验加载次数根据构件破坏情况而定,加载至构件表面出现损伤或者产生严重变形使构件丧失承载能力^[9]。连续冲击构件实际加载次数见表4。

表4 连续冲击构件实际加载次数

Tab. 4 The times of continuous impact members

构件编号	加载次数	构件编号	加载次数
HCS-2.5	1	HCS-3	1
HSS-2.5	1	HSS-3	1
CS-2.5	2	LV-3	1
SS-2.5	4	CS-3	2
HLV-3	1	SS-3	3

图 4 为连续冲击构件在不同冲击高度下采集到的冲击力时程曲线,其中 SS-2.5(3)和 CS-3(1)由于采集异常导致数据缺失。空管构件受到单次冲击即发生严重变形,所以为保护冲击仪器只对空管构件进行 1 次冲击作用,构件编号中的数字代表该构件所承受的冲击次数。连续冲击构件曲线走势同单次冲击。另外,CS-2.5(2)的曲线截取的是 2 次冲击过程,构件在经历大约 0.02s 冲击作用后发生卸载,但是构件依然有较强的抗冲击能力。相较于空管构件 1 次卸载即冲击结束而言,组合构件由于内部混凝土的存在对整体的抗冲击能力有很大的提高。图 4 (a),(b),(d)中组合构件多次冲击以及空管构件单次冲击得到的冲击力时程曲线对比发现,组合构件遭受多次不变能量的冲击,平台段冲击力仍然高于空管构件,说明外钢管对核心混凝土起到了很好的包裹和约束作用。混凝土可以吸收大量冲击能,从而降低外管受撞击后的局部屈曲,而内钢管又有效地对混凝土进行支持,三者协同变形共同工作,使得组合构件抗连续冲击的承载能力优于空管构件。图 4(c)中 CS-3 构件在 2 次冲击后平台段冲击力低于空管构件,此外不锈钢组合构件在小能量作用下能够承受的加载次数多于普通钢组合构件,主要是由于不锈钢相较于普通钢具有更为优越的延展性和强度,对核心混凝土起到了良好的约束作用,因此不锈钢组合构件受到小能量多次冲击作用表现的性能更加优异。

2.3 跨中残余变形分析

2.3.1 单次冲击的跨中残余变形

图 5 为部分构件第 1 次冲击的跨中残余挠度(Δ_0)与冲击高度(H)的关系曲线。可以看出,同组构件的跨中残余挠度随着冲击高度的增加而不断增加,这与基本理论相符。图 5 中铝合金组合构件在 1m 高度冲击作用时跨中残余变形达到 36.36 mm,相较于另外 2 种材料对于冲击荷载的承受能力略差。表 5 为部分构件跨中残余变形的具体数据,通

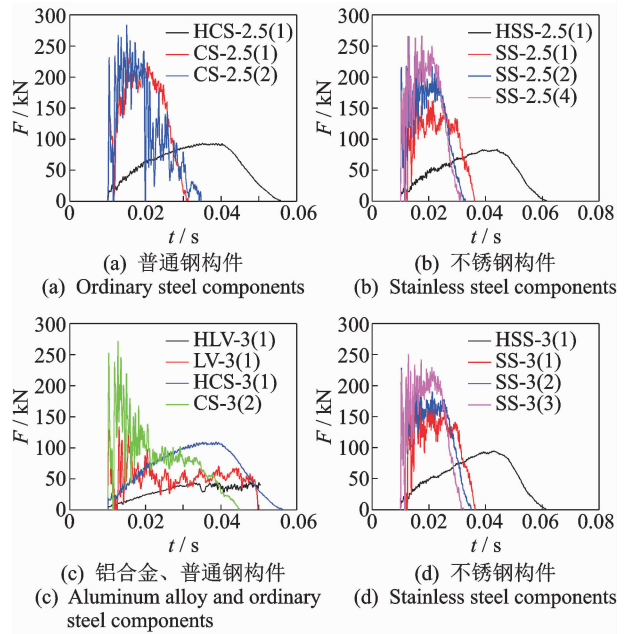


图 4 连续冲击构件冲击力时程曲线
Fig. 4 Time history curves of members under continuous loads

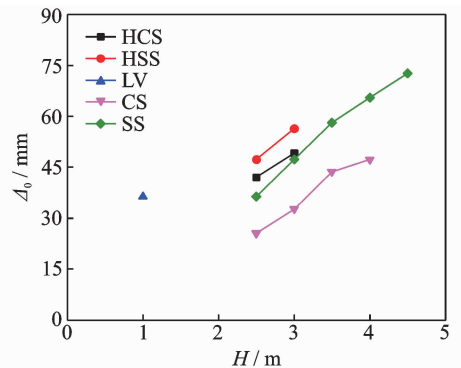


图 5 单次冲击的构件跨中残余变形
Fig. 5 The residual deformation of members under single load

过对比 HSS,SS,HCS 和 CS 这 4 组构件可以得出: 2 种外管材质,由空管构件变为组合构件,普通钢材质效果更加显著;针对相同截面形式的构件,外管材质为普通钢的构件跨中残余变形更小。

表 5 构件跨中残余变形

Tab. 5 The residual deformation of members in middle span

冲击高度/m	构件跨中残余变形/mm				组合影响/%		不同材质影响/%	
	HSS(A)	SS(B)	HCS(C)	CS(D)	(A-B)/A	(C-D)/C	(A-C)/A	(B-D)/B
2.5	47.27	36.41	42.00	25.52	22.97	39.24	11.15	29.91
3.0	56.39	47.25	49.12	32.72	16.21	33.39	12.89	30.75
3.5		58.20		43.67				24.97
4.0		65.51		47.27				27.84

2.3.2 连续冲击的跨中残余变形

图6为2.5和3 m条件下连续冲击构件的跨中残余变形数据,组合构件在每次冲击过程中形成的残余变形等于该次冲击后构件的最终变形减去上次冲击后构件的最终变形。SS-2.5, SS-3的试验数据表明,不锈钢组合构件在每次冲击过程中所产生的残余变形逐渐减小,因为内部混凝土受到低能量作用时产生的损伤并不明显,受到的冲击作用反而压实了混凝土内部的微裂缝和微空洞,使得混凝土与内外2层钢管之间的结合更加紧密,提高了构件的整体抗弯能力。

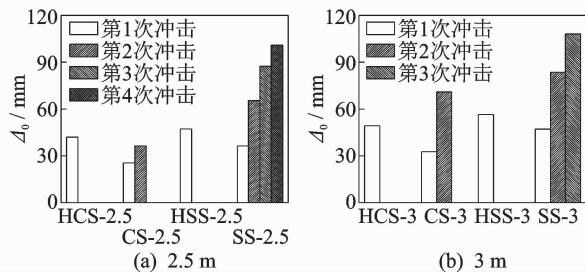


图6 连续冲击的构件跨中残余变形

Fig. 6 The residual deformation of members under continuous loads

3 有限元模拟

3.1 模型的建立

本研究中不锈钢的本构模型采用 Rasmussen 全局应力-应变曲线,同时采用 Cowper-Symonds 本构模型来考虑冲击荷载下材料应变强化的问题。本研究应变率较低,其计算公式如式(1)所示

$$\sigma_d/\sigma_s = 1 + (\dot{\epsilon}/D)^{1/p} \quad (1)$$

其中: σ_d 为钢材在应变率 $\dot{\epsilon}$ 时的应力值; σ_s 为钢材在静载下的应力值; $\dot{\epsilon}$ 为钢材经历的应变率; 相关参数 D, p 分别取值为 6 844/s 和 3.91^[8]。

铝合金的本构关系采用 Ramberg-Osgood 模型,利用 $10n = f_{0.2}$ 表达式进行描述。因为落锤冲击的应变率范围对于铝合金强度的提高影响不大,所以在铝合金的本构中未考虑应变强化。普通钢的本构模型采用韩林海^[10]提出的5段式应力-应变关系曲线,并且也考虑了应变率强化效应,模型及相关参数取值同不锈钢材料。

混凝土的本构采用动力分析中收敛性较好的塑性损伤模型,单轴应力-应变关系采用韩林海^[10]提供的模型,该模型考虑了组合构件中外管对于混凝土的约束作用。混凝土受到冲击作用时同样应变强化明

显,笔者仅考虑了受压时强度的提高,如式(2)所示

$$\sigma_d/\sigma_s = (\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)^{1.026\alpha} \quad (\dot{\epsilon}_d \leq 30/s) \quad (2)$$

其中: σ_d 和 σ_s 分别为混凝土在动力加载与静力加载时的抗压强度; $\dot{\epsilon}_d$ 和 $\dot{\epsilon}_s$ 分别为应变率在动力加载与静力加载时的对应值, $\dot{\epsilon}_d = 10/s$, $\dot{\epsilon}_s = -30 \times 10^{-6}/s$; α 取值见欧洲模式规范。

与抗压强度相对应的峰值压应变采用式(3)进行计算

$$\epsilon_{cd}/\epsilon_{cs} = (\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s)^{0.02} \quad (3)$$

其中: ϵ_{cd} 和 ϵ_{cs} 分别为混凝土在动力加载与静力加载时的峰值应变。

笔者采用 ABAQUS 中 Explicit 模块分析冲击过程,为了保证计算速度与模型的收敛,内、外管采用三维壳单元(S4R),填充混凝土并固支支座,端板采用三维实体单元(C3D8R),落锤在冲击过程中变形很小,视作刚体,用刚体壳单元(R3D4)模拟。模型中存在的所有接触面均采用通用接触,即法线方向设为硬接触,切线方向采用库伦摩擦因数,其中外管外表面与落锤界面、不锈钢内表面与混凝土界面、铝合金内表面与混凝土界面、Q345 钢与混凝土界面、不锈钢外表面与支座界面、Q345 钢外表面与支座界面、铝合金外表面与支座界面库伦摩擦因数^[11-16]依次取为 0, 0.3, 0.6, 0.25, 0.1, 0.15 和 0.05,有限元模型如图7所示。

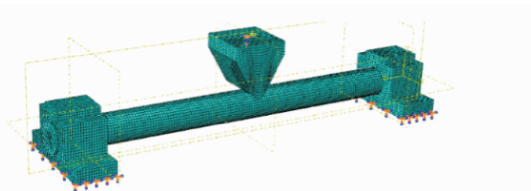


图7 有限元模型

Fig. 7 The finite element model

3.2 有限元模型验证

为判断模型的可靠性,笔者通过计算得到的冲击力时程曲线、跨中残余变形与单次冲击构件试验结果作对比。限于篇幅,仅给出部分构件的冲击力时程曲线模拟与试验对比。由图8(a,b)可以看出,两者曲线走势基本一致,但是计算结果与试验结果存在的偏差较大,这是由于冲击过程中夹具与空管构件之间的空隙会逐渐变大,并且空管构件对于自身初始缺陷敏感性较大。图8(c,d)为部分组合构件的冲击力时程曲线模拟与试验对比,总体上曲线变化趋势是一致的,但试验卸载开始时间相对于计算结果提前,这是因为模型中没有考虑外管的开裂

和混凝土的裂缝扩展问题。表6为组合构件的冲击力峰值($F_{s,s}$)、冲击力平台值(F_m)、冲击持续时间(t)以及跨中残余挠度(Δ_0)试验和模拟结果比较,可以看出 $F_{s,s}/F_{s,e}$ 的平均值和标准差分别为 1.07 和

0.09, $F_{m,s}/F_{m,e}$ 的平均值和标准差分别为 1.00 和 0.06, t_s/t_e 的平均值和标准差分别为 1.08 和 0.08, $\Delta_{0,s}/\Delta_{0,e}$ 的平均值和标准差分别为 1.08 和 0.04。可见,总体上模拟与试验结果基本吻合。

表6 组合构件模拟结果与试验结果比较

Tab. 6 The comparison of simulation and experimental impact results

编号	$F_{s,e}/$ kN	$F_{s,s}/$ kN	$F_{s,s}/$ $F_{s,e}$	$F_{m,e}/$ kN	$F_{m,s}/$ kN	$F_{m,s}/$ $F_{m,e}$	$t_e/$ ms	$t_s/$ ms	$t_s/$ t_e	$\Delta_{0,e}/$ mm	$\Delta_{0,s}/$ mm	$\Delta_{0,s}/$ $\Delta_{0,e}$
LV-1	99.74	101.69	0.98	72.25	78.20	1.08	32.70	33.84	1.03	36.36	40.24	1.11
SS-2.5	140.10	144.23	1.03	127.52	133.93	1.05	26.21	30.60	1.17	36.41	41.14	1.13
SS-3	171.74	169.67	0.99	136.25	136.76	1.00	26.37	30.80	1.17	47.25	48.20	1.02
SS-3.5	163.26	180.51	1.11	131.87	136.09	1.03	29.52	31.50	1.07	58.20	59.36	1.02
SS-4	145.84	189.75	1.30	140.71	138.10	0.98	29.86	32.50	1.09	65.51	70.75	1.08
SS-4.5	203.85	205.31	1.01	144.41	140.23	0.97	29.91	32.60	1.09	72.72	80.72	1.11
CS-2.5	134.43	141.92	1.06	201.47	172.89	0.86	21.32	24.96	1.17	25.52	28.07	1.10
CS-3.5	143.77	160.14	1.11	175.34	179.54	1.02	26.34	27.24	1.03	43.67	45.85	1.05
CS-4	177.63	189.80	1.07	176.91	185.94	1.05	30.46	28.08	0.92	47.27	51.05	1.08
平均值			1.07			1.00			1.08			1.08
标准差			0.09			0.06			0.08			0.04

LV-1 构件和 CS-4 构件试验记录的平台值取第 1 个平台值,此时钢管未断裂;下角标 e 和 s 分别代表试验和模拟结果

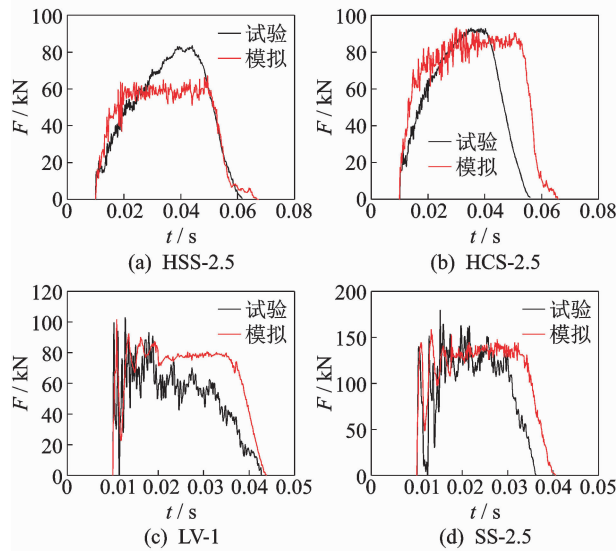


图8 冲击力时程曲线对比图

Fig. 8 The comparison of time-history curves of impact force

4 结论

- 1) 中空夹层金属管混凝土组合构件的抗冲击能力要明显优于空管构件。
- 2) 铝合金组合构件相较于普通钢及不锈钢组合构件,整体抗弯能力较差,在单次冲击作用下铝合金、普通钢及不锈钢组合构件的极限承受能量分别

为 4.18 kJ 以下、12.55~14.65 kJ 之间和 18.83 kJ 以上。

3) 连续冲击作用下,不锈钢组合构件承受加载的次数最多,对于抵抗小能量多次冲击加载更有优势。

4) 利用有限元 ABAQUS 软件建模得到的计算结果与试验结果基本吻合。

参 考 文 献

[1] 付军强. 海上可移动钻井装置发展综述与展望[J]. 中国海洋平台, 2003, 18(5): 6-9.
FU Junqiang. A review and prospects for the development of offshore mobile drilling units[J]. China Offshore Platform, 2003, 18(5): 6-9. (in Chinese)

[2] 王洪欣, 查晓雄, 叶福相. 空心钢管混凝土构件抗侧向冲击性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 107-110.
WANG Hongxin, ZHA Xiaoxiong, YE Fuxiang. Impact resistance of hollow concrete filled steel tubular members subjected to lateral impact loading[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(8): 107-110. (in Chinese)

[3] 曹浩煜. 侧向撞击作用下中空夹层钢管混凝土柱的动力性能及在汽车碰撞下的抗剪承载力[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.

- [4] WANG R, HAN L H, TAO Z. Behavior of FRP-concrete-steel double skin tubular members under lateral impact: experimental study [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 95: 363-373.
- [5] AGHDAMY S, THAMBIRATNAM D P, DHANASEKAR M, et al. Effects of structure-related parameters on the response of concrete-filled double-skin steel tube columns to lateral impact [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 108: 351-368.
- [6] 辜应卓. 高强钢中空夹层钢管混凝土抗撞性能有限元分析[C]//第25届全国结构工程学术会议论文集(第II册). 北京:工程力学杂志社, 2016: 306-312.
- [7] 姜珊. 侧向撞击作用下不锈钢-混凝土-钢管组合构件的动力性能研究[D]. 太原:太原理工大学, 2016.
- [8] 侯俊. 不锈钢-混凝土-钢管组合构件在低速撞击下的力学性能研究[D]. 太原:太原理工大学, 2017.
- [9] 刘灿亮. 多次连续冲击下钢管混凝土的动力学特性研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2018.
- [10] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 2版. 北京:科学出版社, 2007: 66-110.
- [11] 姜珊, 王蕊. 中空夹层不锈钢钢管混凝土构件的侧向撞击试验及有限元分析[J]. *工业建筑*, 2016, 46(11): 161-167.
JIANG Shan, WANG Rui. Experiment study and finite element analysis of concrete filled stainless and steel double skin tubes member under lateral impact [J]. *Industrial Construction*, 2016, 46(11): 161-167. (in Chinese)
- [12] 王丙斌, 王蕊. 空心率对中空夹层钢管混凝土组合柱耐撞性能影响[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 204-211.
WANG Bingbin, WANG Rui. Effect of hollow ratio on crashworthiness of stainless steelconcretesteel double-skin tubular columns[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 204-211. (in Chinese)
- [13] 史艳莉, 何佳星, 鲜威, 等. 横向撞击荷载作用下中空夹

层钢管混凝土构件的受力性能分析[J]. *兰州理工大学学报*, 2019, 45(4): 132-137.

SHI Yanli, HE Jiaying, XIAN Wei, et al. Analysis of stress performance of hollow concrete-filled double steel tubular component under transverse impact load [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2019, 45(4): 132-137. (in Chinese)

- [14] 刘康利. 新型金属管混凝土海洋平台抗震、抗冰性能研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2018.
- [15] 邹森, 王蕊. 侧向撞击荷载下 FRP 管-混凝土-钢管组合梁抗撞性能的理论分析模型[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(6): 246-252.
ZOU Miao, WANG Rui. Theoretical model for the anti collision performance analysis of FPR tube concrete composite beams under lateral impact load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(6): 246-252. (in Chinese)
- [16] 程普. 低速冲击下玄武岩纤维铝合金层合板力学性能分析[D]. 长春:吉林大学, 2019.



第一作者简介: 石岩, 女, 1978年6月生, 讲师。主要研究方向为海洋平台结构振动控制。曾发表《MTMD应用于海洋平台结构的参数优化研究》(《建筑科学与工程学报》2017年第34卷第4期)等论文。

E-mail: 470663896@qq.com

通信作者简介: 张纪刚, 男, 1975年12月生, 教授、博士生导师。主要研究方向为海洋平台结构振动控制、大跨钢结构关键施工技术及建筑垃圾的再生利用等。

E-mail: jiangzhang@126.com

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管, 南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办, 是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献, 包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等, 不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊, 双月刊, 每逢双月末出版, 每本定价 30 元, 全年 180 元。欢迎订阅和投稿, 欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址: 南京市御道街 29 号 邮政编码: 210016 电话: (025) 84893332

邮发代号: 28-239 E-mail: qchen@nuaa.edu.cn 网址: http://zdcns.nuaa.edu.cn