DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0391-09

商用飞机撞击核电站屏蔽厂房数值模拟*

刘晶波[1],韩鹏飞[1],郑文凯[1],陆新征[1],林 丽[2]
(1. 清华大学土木水利学院土木工程系,北京 100084;
2. 清华大学航天航空学院工程力学系,北京 100084)

摘要:为研究大型商用飞机撞击核电站屏蔽厂房的毁伤特性,建立了 Boeing 767 商用飞机和双钢板混凝土屏蔽厂房的有限元模型,模拟两者的相互撞击作用过程,得到飞机不同部位(机身、发动机)对屏蔽厂房的撞击力时程曲线,对每一个作用部分给出简化撞击力曲线和作用面积,确定了撞击力分布形式。结果分析表明:飞机轴向网格尺寸对撞击力影响较大;屏蔽厂房被撞击部位变形明显,其他区域变形较小;撞击速度对撞击作用时间影响较小,而对结构响应位移影响很大,撞击力合力随着撞击速度的降低迅速下降。

关键词:固体力学;飞机撞击;有限元模型;屏蔽厂房;撞击力;分布形式
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13015 **文献标志码**:A

20 世纪 60 年代,美国核管会对三哩岛核电站的安全评估中,首次加入了飞机撞击核电站的安全评估内容[1],1974 年德国内政部在设计核电站时以鬼怪式战斗机的撞击力作为飞机撞击设计荷载[2],而后瑞士、比利时和德国的所有核电站均明确考虑飞机的意外撞击。上述安全评估和设计基准只是基于小型战斗机或小型商用飞机的撞击力。2001 年 9·11 事件引起了各国对安全壳遭受大型商用飞机撞击安全评估的关注,2009 年美国核管会颁布了新的联邦法规,使抵御大型商用飞机撞击成为新建核电厂安全性评审的一项重要内容[3]。欧洲国家也纷纷考虑核电厂的安全,要求重要构筑物能够承受大型飞机的恶意撞击[4]。

J. D. Riera[5]提出了飞机撞击核电站安全壳的理论简化模型(Riera 模型),给出了飞机撞击力的计算公式。此后,许多学者从理论分析、试验研究、数值模拟方面来研究飞机的撞击机理和对安全壳结构的毁伤效应。K. Hornyik[6]、L. Y. Bahar 等[7]和 T. Sugno 等[8]分别对 Riera 模型进行了修正,Wolf 等根据理论模型计算了 Boeing 707-320 和 FB-111 战斗机的撞击力,并与 Riera 模型的计算结果进行了对比分析[9]。上述理论模型都是一维分析模型,只考虑垂直撞击,仅给出了撞击合力,而不能给出撞击力的分布形式。

W. Nachtsheim 等[10]和 E. Rüdiger 等[11]讨论了 Meppen 试验的弹体、靶体等具体情况,分析表明撞击速度以及弹体变形行为是钢筋混凝土靶板极限承载能力的关键因素,靶板厚度的变化比钢筋率的变化更能影响靶板对撞击的响应;另外一些学者也分别进行了缩比飞机撞击的相关撞击试验,分析了撞击的毁伤效应[12-15]。T. Sugano 等[8,16-17]进行了鬼怪战斗机原型机撞击混凝土板,以及所配装的原型发动机和缩比发动机撞击混凝土板的实验研究。缩比试验可获得某种缩尺比例下的撞击效应,也可与试验数值模拟结果对比,提高原型飞机撞击数值模拟的可信度;原型飞机撞击试验虽能揭示相关撞击机理,但比较难以实施,目前原型商用飞机的撞击试验未见相关报道。

数值模拟方法主要分为 3 类:第 1 类是模拟飞机撞击的缩比试验,把数值计算结果与实验结果对比,通过实验验证数值模拟的合理性,从而为飞机原型机的撞击提供可靠支撑[18-19];第 2 类是通过 Riera 模型或者飞机撞击刚性墙模型计算撞击力曲线,将撞击力加载到安全壳结构上,来研究撞击毁伤效

* **收稿日期**:2014-10-28;**修回日期**:2015-08-25
基金项目:国家科技重大专项项目(2011ZX06002-10)
第一作者:刘晶波(1956—),男,博士,教授,liujb@tsinghua.edu.cn。

应[20-21]；第 3 类是建立飞机和核电站安全壳的数值计算模型，模拟两者的相互撞击作用过程[22]。第 2 类方法有其限制性，不能考虑飞机和被撞结构的相互作用，加载面积较难确定，撞击区域的毁伤效应也较难评估，而第 3 类方法可以克服第 2 类方法的缺点，所以本文中采用第 3 类方法来模拟大型商用飞机对核电站屏蔽厂房的撞击。

1 计算模型

1.1 屏蔽厂房模型

目前国际上通用的核电站设计较为普遍是 AP1000 和 CPR1000 等 2 种方案。CPR1000 采用的是内衬钢板布置，AP1000 采用的是内外双钢板布置。本文中以 AP1000 核电站为原型，结合国际通用的核电站结构尺寸对其进行合理简化，得到核电站屏蔽厂房模型。屏蔽厂房筒体由 1 m 厚混凝土芯层和 13 mm 厚钢面板夹芯结构组成，筒体外半径为 22 m，高 44 m；厂房顶部近似为外半径 22 m 的半球形；屏蔽厂房总高度为 66 m，如图 1 所示。使用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件，混凝土采用 SOLID164 实体单元模拟，钢板采用 SHELL163 壳单元模拟。有限元模型采用共节点建模，即认为钢板和混凝土间具有可靠连接，忽略其相对滑移。

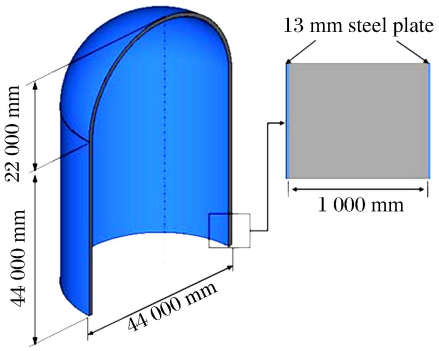

图 1 核电站尺寸

Fig. 1 Size nuclear power plant

1.2 飞机模型

一般而言，选取的飞机需要具有很好的代表性，这涉及到飞机的飞行质量、飞机的质量分布，飞机的飞行量等。目前在中国的商用飞机从飞行时间和拥有数量来看，主力机型为波音 737 系列和空客 320 系列。波音 737 系列的质量 70～80 t，长度 32～42 m；空客 320 系列重量在 65～85 t，长度 30～44 m。本文中以波音公司的 Boeing 767-200ER 为原型，Boeing 767-200ER 是典型的大型商用客机，载客量可达 255～290 人，其总长度为 48.5 m，翼展为 47.6 m，机身直径为 5 m，如图 2 所示。对 Boeing 767-200ER 做了相应的简化，飞机全部采用壳单元模拟，通过调整各部分壳单元的厚度准确定义飞机重量，添加地板和横隔板模拟飞机内部连接和构造，机身材料及内部横隔板地板为航空铝合金，铝合金壳单元厚度为 22 mm，发动机为钢材，其壳单元厚度为 10 mm，简化后模型飞机总重为 80 t，其中 2 个发动机质量均约 5 t。机身和机翼采用共用节点建模，考虑材料失效，飞机单元失效时采用 EROSION 算法删除单元。飞机和核电站屏蔽厂房有限元模型如图 3 所示。

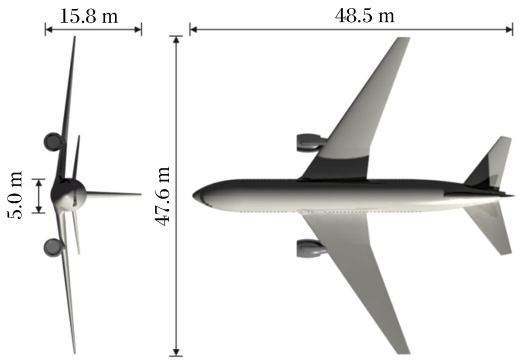

图 2 Boeing 767-200ER 尺寸

Fig. 2 Size of Boeing 767-200ER

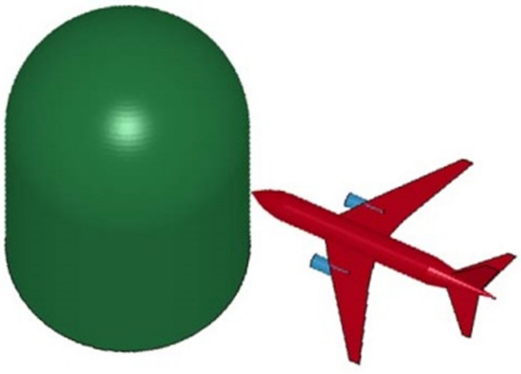

图 3 飞机撞击屏蔽厂房的模型

Fig. 3 Model of the aircraft hitting a shield building

2　本构模型和计算参数

2.1　钢和铝合金材料本构

Boeing 767-200ER 的机身材料为航空用铝合金，发动机所用的钢材以及双钢板混凝土的钢板属于弹塑性材料，采用塑性随动硬化（PLASTIC_KINMATIC）材料模型描述其材料本构关系；应变率效应根据文献[23]中采用 Cowper-Symonds 模型描述，方程为：

$$\sigma_{yd}=\sigma_y\left(1+\frac{\dot{\varepsilon}}{P}\right)^{1/C} \tag{1}$$

式中：σ_{yd}为动态屈服强度，σ_y 为屈服强度，$\dot{\varepsilon}$ 为应变率，C、P 为应变率常数，根据文献[23]取值。考虑单元失效删除，失效单元的有效塑性应变 ε_{pe} 的取值依据文献[24-25]取值，计算参数见表 1。表 1 中 σ_s 为单轴抗压强度，ρ 为密度，E 为弹性模量，T 为切线模量，ν 为泊松比。

表 1　计算参数

Table 1　Calculation parameters

材料	σ_y/MPa	σ_s/MPa	ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	T/GPa	ν	C	P	ε_{pe}
钢	447	—	7 850	210	5	0.3	5	40	0.8
铝合金	503	—	2 810	71.9	0.5	0.33	4	6 500	0.1
混凝土	—	48	2 300	—	—	0.2	—	—	0.17

2.2　混凝土材料本构

混凝土材料模型为 Concrete_Damage_Rel3，仅需输入混凝土单轴抗压强度 σ_s、密度 ρ、泊松比 ν、和应变率关系曲线即可，其他模型参数可自动生成，应变率关系曲线采用 K&C 模型，该模型是在 CEB 模型基础上改进得来[26]。在混凝土单元失效时，采用 EROSION 算法删除单元，来模拟混凝土成坑和剥落等效果，混凝土本构计算参数见表 1。

2.3　飞机网格尺寸效应

由于网格的划分会对数值计算结果造成一定影响，为了保证结果的稳定和考虑计算成本，利用飞机撞击刚性墙，来分析网格尺寸对撞击力 F 的影响，撞击模型如图 4 所示。首先，将飞机的环向网格划分为 12、24 和 48 份 3 种情况，轴向网格尺寸均取为 0.25 m。不同环向网格尺寸的撞击力合力如图 5 所示。由图 5 可以看出环向网格采用 48 和 24 份时撞击力曲线平稳，效果较好，除个别尖点外，总体差别不大，说明环向尺寸对撞击结果的影响较小。然后，将飞机的环向网格划分为 24 份，轴向网格尺寸设置为 1、0.25、0.125 m，撞击力合力对比如图 6 所示。通过比较图 5 和 6 可以看出，轴向网格尺寸对计算的精度影响较大，当网格尺寸过大时结果离散非常大，而轴向网格尺寸为0.125和0.25 m时结果比较接近，趋于稳定。

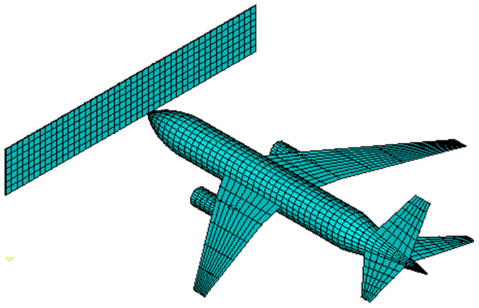

图 4　飞机撞击刚性墙模型

Fig. 4　Model of the aircraft impacting on a rigid wall

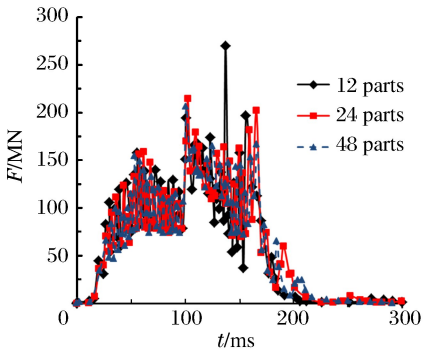

图 5　轴向网格尺寸为 0.25 m 的撞击力曲线

Fig. 5　Impact force curves for the circular gridding size of 0.25 m

3 飞机撞击核电站屏蔽厂房模拟

根据2.3节分析，将飞机的环向网格划分为24份，轴向网格尺寸设置为0.25 m；核电站屏蔽厂房的实体单元和壳单元的网格尺寸设置为0.25 m。飞机撞击核电站屏蔽厂房模拟中涉及到飞机的撞击位置、角度和速度等。文献[27]中指出最不利的撞击位置在筒体和上部结构的交接处，而垂直撞击为屏蔽厂房整体分析中最不利的作用方式。所以模拟中采用飞机垂直撞击核电站屏蔽厂房筒体和上部结构的交界处，撞击速度取为200 m/s。图7给出了0.105和0.130 s时的撞击图。0.105 s时刻，机身撞击屏蔽厂房；0.130 s时刻，发动机开始与屏蔽厂房接触，混凝土受到飞机机身及发动机的撞击。

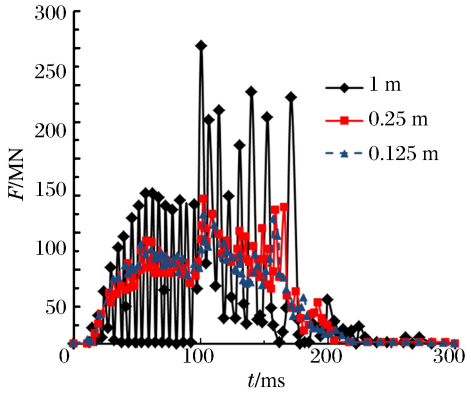

图6 环向网格为24份的撞击力曲线

Fig. 6 Impact force curves for the axial gridding number of 24

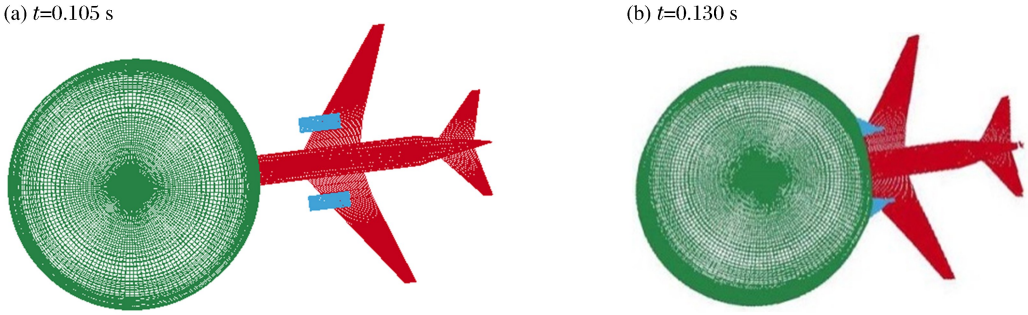

图7 撞击过程的有限元模拟

Fig. 7 Finite element simulation of the impacting process

3.1 撞击力对比

距被撞击中心点上方3、5、7和9 m等4个点位移(s)曲线如图8所示，“A”表示飞机直接撞击方式得到的结果，“B”表示所得撞击荷载加载方式得到的结果。图9给出了撞击速度为200 m/s时，采用对飞机和安全壳采用有限元模拟(弹-塑性曲线)[28]、Riera模型(Riera曲线)和将屏蔽厂房的钢板和混凝土视为刚性体(rigid曲线)[28]和弹性体(elastic曲线)[28]的撞击力合力之间的对比。

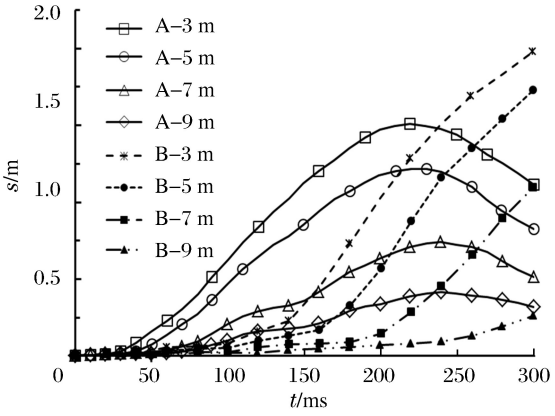

图8 屏蔽厂房位移曲线

Fig. 8 Curves showing the shield building's displacement

Riera模型中采用的飞机撞击力的计算公式为[5]：

$$F(t)=p_c[x(t)]+\mu[x(t)]v^2 \qquad (2)$$

式中：$F(t)$为瞬时撞击力合力，$p_c[x(t)]$为飞机在x处的瞬时压溃力，$\mu[x(t)]$为飞机在x处的线密度，v为飞机未变形部分的剩余速度。该方法方便有效，可计算飞机垂直撞击刚性目标的撞击合力。将钢板和混凝土视为刚性体和弹性体时，混凝土的弹性模量按照(GB 50010-2010)《混凝土结构设计规范》取值为31.5 MPa[29]，其他所需的计算参数和弹塑性体一致。

对于飞机直接撞击方式，随着距离撞击中心点越远撞击响应迅速减小，最大撞击合力约为170 MN（如图 9 中弹-塑性曲线所示），开始撞击力为零，这是因为初始时刻飞机与屏蔽厂房有 3 m 的距离。撞击力的变化过程主要有以下几个阶段：从机头顶端开始碰撞产生撞击力，到全面积接触产生第一个顶点，之后随着飞机速度的下降，撞击力稍有下降，到发动机碰撞时撞击力突然增大，到达顶端，之后飞机机翼与屏蔽厂房全面接触，撞击力有所反弹，而后由于飞机剩余速度已经很小，因此撞击力不断减小。

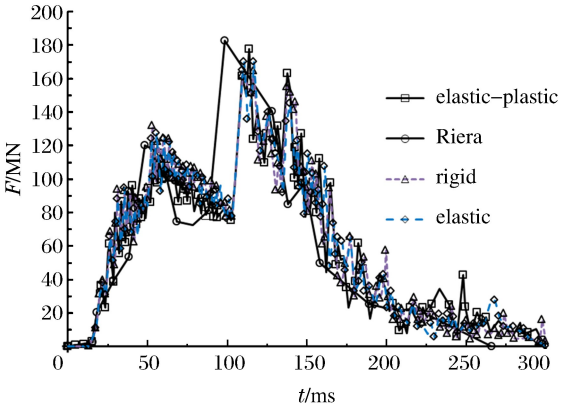

图 9　撞击合力对比

Fig. 9　Comparison of total impact force

从图 9 可以看出，Riera 方法求解出的撞击力合力与有限元数值模拟得出的结果除第 2 峰值处相差较大外，总体形状吻合较好，变化趋势比较一致，说明上述数值计算结果还是可信的；3 种数值计算工况下整体作用时间、形状及峰值相近，主要原因是飞机的刚度相对屏蔽厂房来说要小得多，屏蔽厂房的刚度变化对撞击力的合力影响较小，说明可以假设核电站屏蔽厂房为刚性体或弹性体来估算撞击合力。

3.2　撞击速度的影响

分别以 150 m/s 和 100 m/s 的速度垂直撞击核电站屏蔽厂房，撞击位置同 200 m/s 情形。撞击力合力 F、机身未破坏部分的速度 v 变化和屏蔽厂房壳体位移 s 曲线如图 10～13 所示。从图中可以看出，随着撞击速度的下降，撞击力迅速下降。尽管初始撞击速度不同，但机身未破坏部分速度降为零所用的时间接近。撞击速度为 150 m/s 时，发动机约在 0.165 s 撞击到核电站，此时速度约为 50 m/s，发动机撞击屏蔽厂房引起的应力峰值不是很高，屏蔽厂房结构位移响应也有较大的下降，并随着距撞击中心的距离增大而大幅下降；撞击速度为 100 m/s 时，由于撞击速度比较小，撞击至距离机头 13 m 处，飞机速度降为零，发动机没有撞到屏蔽厂房，故撞击力没有出现由发动机撞击引起的峰值，飞机机身与机翼交汇处也未破坏，厂房位移响应也有较大的下降。

3.3　撞击力的分布形式

Riera 模型可以给出飞机的撞击力合力，但不能给出其分布情况，一般是将撞击合力平均分布到机身作用面积内，给屏蔽厂房进行加载。按照该方法将 200 m/s 撞击时所得撞击合力均布加载到屏蔽厂房上，计算结果见图 8 中的“B”类曲线。从图 8 中可以看出，采用对飞机直接撞击进行数值模拟和将 Riera模型的撞击力加载到厂房上这两种方式的结果差异较大，这说明不能简单地将荷载均匀分布

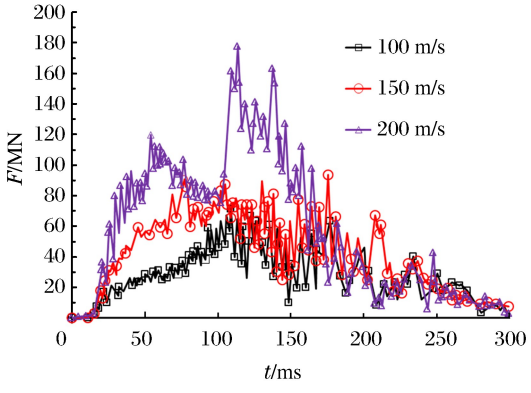

图 10　不同撞击速度对撞击合力的影响

Fig. 10　Influence of impact velocity on total impact force

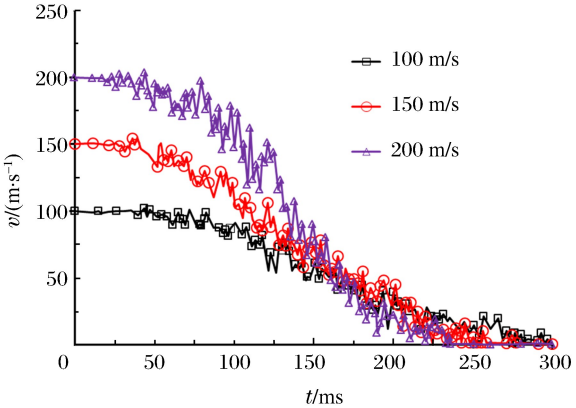

图 11　飞机机身未破坏部分的速度对比

Fig. 11　Velocity comparison of undamaged fuslage

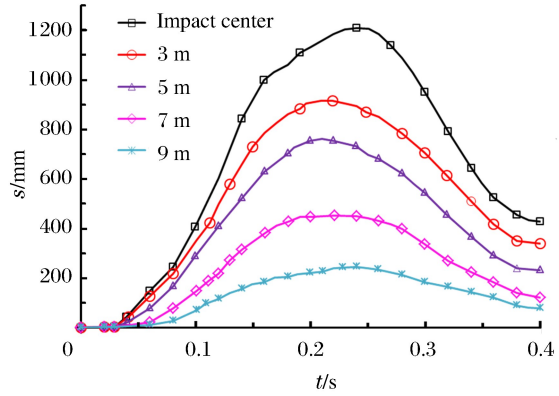

图 12 150 m/s 撞击速度下的屏蔽厂房位移曲线

Fig. 12 Curves showing the shield building's displacement at the impact velocity of 150 m/s

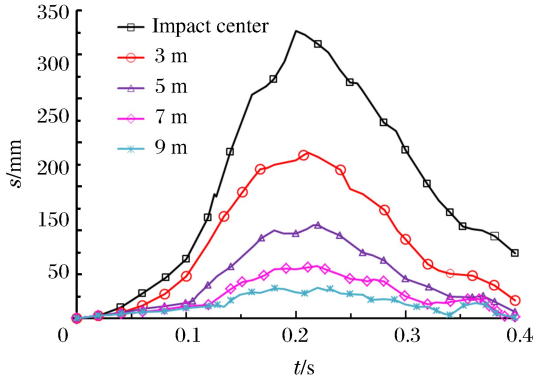

图 13 100 m/s 撞击速度下的屏蔽厂房位移曲线

Fig. 13 Curves showing the shield building's displacement at the impact velocity of 100 m/s

在机身作用面积上,而必须考虑不同部位的荷载大小及分布。

本文中的撞击力分布是根据撞击作用面积内的接触力来讨论分析的,将屏蔽厂房与飞机的接触作用面分为 3 个部分,第 1 个部分与机身接触,作用面为机身截面,即半径约为 2.6 m 的圆;第 2 个部分与发动机接触,作用面为 2 个发动机截面,每个截面分别为半径约 1.3 m 的圆,圆心距飞机轴线为 7 m;第 3 部分为飞机其它部分与屏蔽厂房接触,主要是机翼等。飞机撞击区域划分如图 14 所示。由于第 3 部分的接触面积较难确定,机身与机翼的连接处存在较大的集中质量,所以第 1 部分的面积要比机身截面面积大一些,并考虑单元尺寸形状为方形,将机身截面等效为边长为 6 m 正方形;同样对于发动机的接触面积也作了一定放大,发动机截面等效为边长 4 m 正方形,这样也会包含机翼的一部分面积。这样得出的分布撞击力比实际分布撞击力要大一些。加载面积取为机身和发动机的截面积。

图 15 给出了第 1 部分和第 2 部分撞击力以及两部分撞击力合力与全部撞击力的对比情况。由图 15(a)可以看出,第 1 部分和第 2 部分的撞击合力占了全部撞击力的绝大部分,而第 3 部分剩余的撞击力相对比较小。经过上述分析,将整个撞击力近似分为第 1 部分和第 2 部分。为了利于工程设计,可将撞击力曲线进行近似简化,简化的原则是简化曲线尽量包络计算给出的撞击力时程曲线,且 2 种曲线的总冲量相同。图 15(a)~(b)给出了不同部分相对应的撞击力时程曲线,图 15(c)给出了总的简化曲线与数值模拟结果对比,总冲量差距 7%以内。通过上述方法即可完成撞击力合力的分配,在工程设计时完成荷载的分别加载。

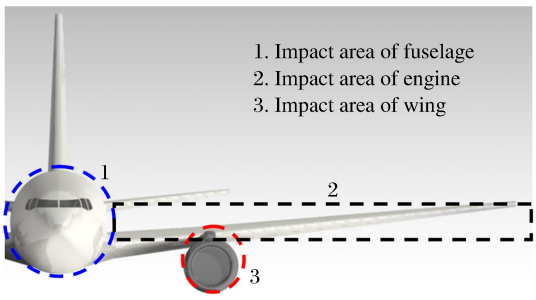

图 14 飞机撞击区域划分

Fig. 14 Reginal division of aircraft impact

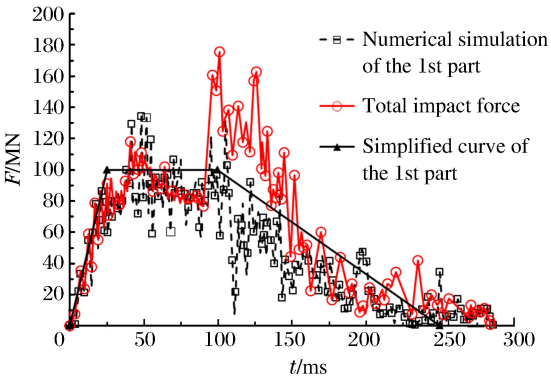

图 15(a) 第 1 部分撞击力与全部撞击力对比

Fig. 15(a) Comparison of the first part of impact force and total impact force

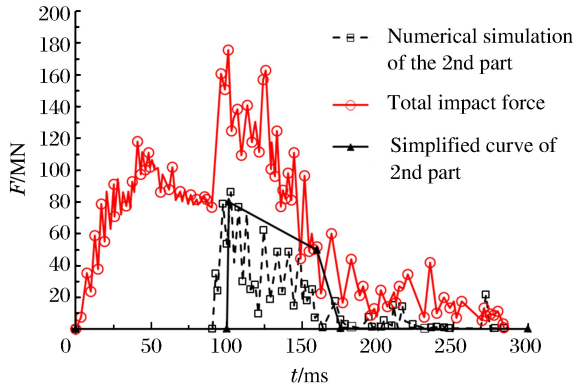

图 15(b)　第 2 部分撞击力与全部撞击力对比

Fig. 15(b)　Comparison of the second part of impact force and total impact force

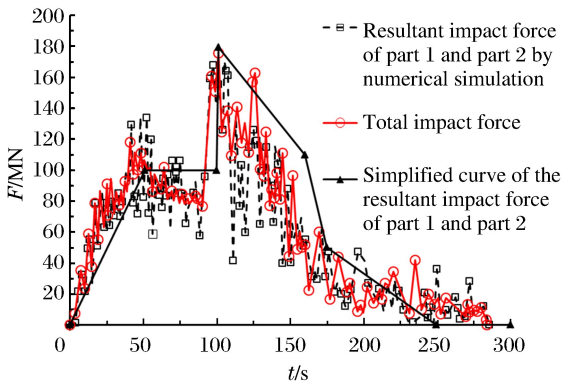

图 15(c)　两部分撞击力叠加与全部撞击力对比

Fig. 15(c)　Comparison of the superposition of two parts of the impact force and total impact force

4　结　论

建立飞机和核电站屏蔽厂房的数值计算模型，模拟和讨论两者的相互撞击作用过程，即采用耦合的方法对大型商用飞机撞击双钢板混凝土屏蔽厂房进行了数值模拟和讨论分析，得出以下结论。

(1) 讨论了飞机环向和轴向网格尺寸对撞击力的影响，相比较而言轴向网格尺寸对撞击力的影响较大；屏蔽厂房被撞击部位变形明显，其他区域变形较小。

(2) 撞击速度对撞击作用时间影响较小，撞击力合力随着撞击速度的降低迅速下降，撞击速度对结构响应位移影响也很大。

(3) 对荷载的分布形式做了进一步的研究，提取屏蔽厂房上与飞机不同部位(机身、发动机)接触区域的撞击力时程，对每一个作用部分给出简化曲线和作用面积，确定撞击力分布形式，可在屏蔽厂房工程设计时分别加载。

参考文献：

[1] Riera J D. A critical reappraisal of nuclear power plant safety against accidental aircraft impact[J]. Nuclear Engineering and Design, 1980,57(1):193-206.

[2] Henkel F O, Wölfel H. Building concept against airplane crash[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984,79(3):397-409.

[3] 汤搏. 关于核电厂防大型商用飞机撞击的要求－核电发展面临的新挑战[J]. 核安全,2010(3):1-12.
Tang Bo. Discussion on the impact of large commercial airplane to nuclear power plant[J]. Nuclear Safety, 2010(3):1-12.

[4] Luther W, Müller W C. FDS simulation of the fuel fireball from a hypothetical commercial airliner crash on a generic nuclear power plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009,239(10):2056-2069.

[5] Riera J D. On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces[J]. Nuclear Engineering and Design, 1968,8(4):415-426.

[6] Hornyik K. Analytic modeling of the impact of soft missiles on protective walls[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. San Francisco, USA, 1977:1-12.

[7] Bahar L Y, Rice J S. Simplified derivation of the reaction-time history in aircraft impact on a nuclear power plant [J]. Nuclear Engineering and Design, 1978,49(3):263-268.

[8] Sugano T, Tsubota H, Kasai Y, et al. Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force[J]. Nuclear Engineering and Design, 1993,140(3):373-385.

[9] Bangash M Y H. Shock, impact and explosion structural analysis and design[M]. Berlin: Springer Press, 2009.

[10] Nachtsheim W, Stangenberg F. Selected results of Meppen slab tests-state of interpretation, comparison with computational investigations[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Chicago, USA, 1983:379-386.

[11] Rüdiger E, Riech H. Experimental and theoretical investigations on the impact of deformable missiles onto reinforced concrete slabs[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Chicago, USA, 1983:387-394.

[12] Herrmann N, Kreuser K, Stempniewski L. An experimental approach to determine load-functions for the impact of fluid-filled projectiles[C]// Proceedings of the 76th Shock and Vibration Symposium. Destin, Florida, USA, 2005.

[13] Lastunen A, Hakola I, Järvinen E, et al. Impact test facility[C]// Proceedings of the 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Toronto, Canada, 2007:1-8.

[14] Mizuno J, Koshika N, Morikawa H, et al. Investigation on impact resistance of steel plate reinforced concrete barriers against aircraft impact part1: test program and results[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Beijing, 2005:2566-2579.

[15] Riedel W, Nöldgena M, Straβburger E, et al. Local damage to ultra high performance concrete structures caused by an impact of aircraft engine missiles[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010,240(10):2633-2642.

[16] Sugano T, Tsubota H, Kasai Y, et al. Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 1: Test program, method and results[J]. Nuclear Engineering and Design, 1993,140 (3): 387-405.

[17] Sugano T, Tsubota H, Kasai Y, et al. Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 2: Evaluation of test results[J]. Nuclear Engineering and Design, 1993,140(3):407-423.

[18] Martina O, Centrob V, Schwoertzigb T. Finite element analysis on the Meppen-Ⅱ-4 Slab Test[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012,247:1-10.

[19] Martina O, Centrob V, Schwoertzigb T. Finite element analysis on the VTT-IRSN flexural failure test[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012,252:1-10.

[20] Iqbal M A, Rai S, Sadique M R, et al. Numerical simulation of aircraft crash on nuclear containment structure [J]. Nuclear Engineering and Design, 2012,243:321-335.

[21] Sadique M R, Iqbal M A, Bhargava P. Nuclear containment structure subjected to commercial and fighter aircraft crash[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013,260:30-46.

[22] Lee K, Han S E, Hong J W. Analysis of impact of large commercial aircraft on a prestressed containment building [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013,265:431-449.

[23] Jones N. Structural Impact[M]. UK: Cambridge University Press, 1989:385-400.

[24] 王天运,任辉启,张力军,等.常规装药侵彻预应力钢筋混凝土安全壳数值模拟[J].工程力学,2005,22(5):126-130.
Wang Tianyun, Ren Huiqi, Zhang Lijun, et al. Numerical simulation of general bomb penetration into pre-stress reinforced concrete containment[J]. Engineering Mechanics, 2005,22(5):126-130.

[25] 王雷,李玉龙,索涛,等.航空常用铝合金动态拉伸力学性能探究[J].航空材料学报,2013,33(4):71-77.
Wang Lei, Li Yulong, Suo Tao, et al. Mechanical behavior of commonly used aeronautical aluminum alloys under dynamic tension[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013,33(4):71-77.

[26] Malvar L J, Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension[J]. ACI Materials Journal, 1998,96 (5):735-739.

[27] Prabhakar G, Ranjan R, Mini K P, et al. Analysis of aircraft impact on containment structure[C]// Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures. Changsha, China, 2003:315-322.

[28] 刘晶波,郑文凯.大型商用飞机撞击核电站屏蔽厂房荷载研究[J].振动与冲击,2014,33(6):97-112.
Liu Jingbo, Zheng Wenkai. Impact load analysis on a nuclear power plant impacted by a large commercial aircraft [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(6):97-112.

[29] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范 GB 50010-2010[S].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2010.

Numerical investigation of shield building for nuclear power plant subjected to commercial aircraft impact

Liu Jingbo[1], Han Pengfei[1], Zheng Wenkai[1], Lu Xinzheng[1], Lin Li[2]

(1. *Department of Civil Engineering, School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*;
2. *Department of Engineering Mechanics, School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

Abstract: To study damage characteristics of the shield building for nuclear power plant subjected to a large commercial aircraft impact, finite element models for Boeing 767 commercial aircraft impacting on a shield building made of steel-concrete-steel sandwich panels are established to simulate the impact process. The following results were achieved: the aircraft's axial mesh size greatly influences the impact force; some parts of the shield building hit by the aircraft undergo significant deformations while the deformation is smaller in the other parts; the impact velocity has little effect on the impact duration but a great effect on the structural response displacement, and the total impact force rapidly declines with the impact velocity decreasing. The impact force arising from different parts of the aircraft hitting the shield building are given, the simplified curve and the load area of different impact forces are obtained, which will contribute to the determination of the impact force distribution form, thus providing a positive help to the engineering design of shield buildings.

Key words: solid mechanics; aircraft impact; shield building; finite element simulation; impact force; distribution form

(责任编辑　王小飞)