

計算科学技術部会セッション「外部ハザード評価のための数値解析」

(4) 航空機衝突に対する原子力発電施設の耐衝撃設計

(4) Aircraft impact assessment for nuclear power plant design

*坪田 張二¹

¹原子力機構

1. 既往研究の概要

本稿では、航空機衝突に対する原子力発電所の耐衝撃設計にかかわる分野の既往研究および最近の研究動向について概説する。航空機衝突に対する原子力発電施設の耐衝撃設計では、図1に示すように航空機の構造の中で特に剛性が高いエンジン部分の衝突による局部損傷（貫入、裏面剥離、貫通）および柔構造物である航空機全体が衝突した場合の全体損傷（パンチング破壊、全体曲げ破壊等）の重要性が認識されている。

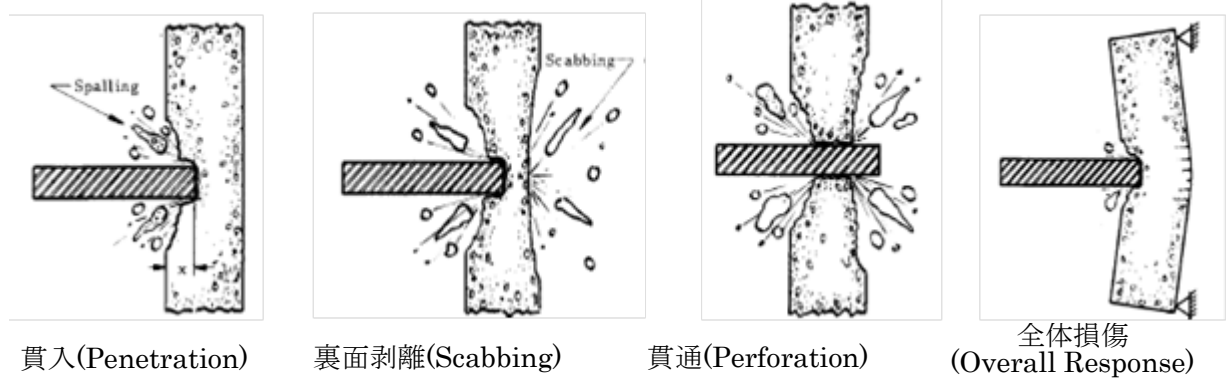


図1 飛翔体の衝突によるコンクリート構造物の損傷・応答¹⁾

このうち局部損傷評価に関しては、古くは1940年ごろから軍事研究をもとにACE式、NDRC式、修正Petry式、BRL式、Anmann & Whitney式、修正NDRC式、BRL式等の実験式が提案された。その後、1970年代後半から原子力発電施設を対象として、竜巻による飛翔体、あるいは事故により生じるタービンブレード等の飛翔体を対象とした実験結果をもとに、Bechtel式、Kar式、Degen式、Chang式、Haldar & Miller式等が提案された。ただし、これらの評価式はおもに衝突時に変形しない剛飛翔体を対象として導かれた評価式である。なお、これらの評価式の概要については、R. P. Kennedy¹⁾、Q. M. Li et al.²⁾等によりまとめて報告されている。

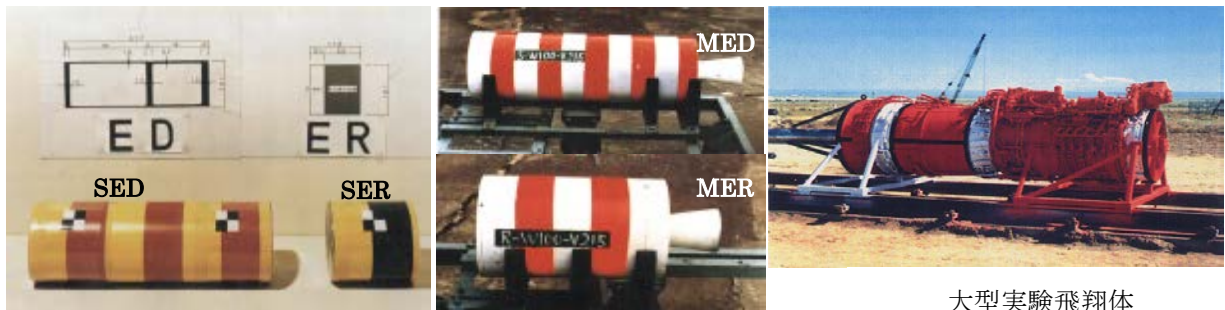


写真1 小型実験・中型実験・大型実験で用いた飛来物³⁾

一方、本報で対象とする飛翔体である航空機のエンジンは、衝突時に飛翔体自身が変形する柔飛翔体に分

類され、前述で紹介した剛飛翔体を対象とした実験式の適用は不可能である。このような背景のもとに、Sugano, Tsubota 等³⁾⁴⁾は航空機エンジンの衝突により生じる鉄筋コンクリート板の局部損傷を定量的に評価し得る評価式（実験式）を確立する目的で、飛翔体の種類（剛飛翔体、柔飛翔体）、衝突速度、ターゲットである鉄筋コンクリート板の板厚等をパラメータとした、小型実験（縮尺1/7.5）・中型実験（縮尺1/2.25）およびF4-Phantom 戦闘機搭載の実物エンジンを用いた大型実験の一連の衝撃実験を実施した。これらの実験で用いた飛翔体を写真1に示す。これらの実験結果をもとに航空機エンジンの衝突による柔飛翔体自身の変形・損傷によるエネルギー消費を考慮した局部損傷低減係数（ α_p, α_s ）を導入した次式の局部損傷評価式を提案した。

$$\text{貫通限界厚さ} = \alpha_p \times (\text{Degen式で算定される限界厚さ}) \quad \alpha_p = 0.65 \quad (1)$$

$$\text{裏面剥離限界厚さ} = \alpha_s \times (\text{Chang式で算定される限界厚さ}) \quad \alpha_s = 0.60 \quad (2)$$

一方、原子力発電所施設を対象とした航空機機体全体の衝突に関する研究は1960年ごろよりヨーロッパを中心に進められた。その中でも1968年にRieraにより提案¹⁴⁾された航空機衝突により生じる衝撃荷重時刻歴関数算定法は「Riera Model」として欧米の既往の原子力発電所の耐衝撃設計に用いられてきた。この Riera Modelは、剛な壁に航空機が直角に初速度V0で衝突し、機体前方より順次圧壊・座屈した場合に生じる衝撃荷重の時刻歴関数を算定する手法であり、次式で表示される。

$$F(t) = Pc[x(t)] + \mu[x(t)] \cdot V(t)^2 \quad (3)$$

F(t): 衝撃荷重の時刻歴関数

Pc(x): 機体先頭からxの距離における機体の座屈・圧壊強度

$\mu(x)$: 機体先頭からxの距離における機体質量分布

V(t): 機体の残存部分の速度

これに対し、Sugano, Tsubota 等⁵⁾は1988年に剛な壁に航空機が衝突した時の衝撃荷重を実験的に評価する目的で、総重量19.0tonの実物のF4-Phantom戦闘機を衝突速度215m/s で衝突させる衝撃実験を、米国のSandia National Laboratoriesで実施した。写真2に実物F4-Phantom戦闘機の衝撃実験の実験状況を示す。またこの実験計測データから評価された衝撃荷重時刻歴関数を図2に示す。最終的には、この実験の結果から、既往のRiera Model に新たに衝撃有効質量係数を導入した次式に示す修正 Riera Model を提案した。

$$F(t) = Pc[x(t)] + \alpha \cdot \mu[x(t)] \cdot V(t)^2 \quad (4)$$

α : 衝撃有効質量係数 ただし $\alpha = 0.9$



写真2 F4-Phantom 戦闘機を用いた衝撃実験状況⁵⁾

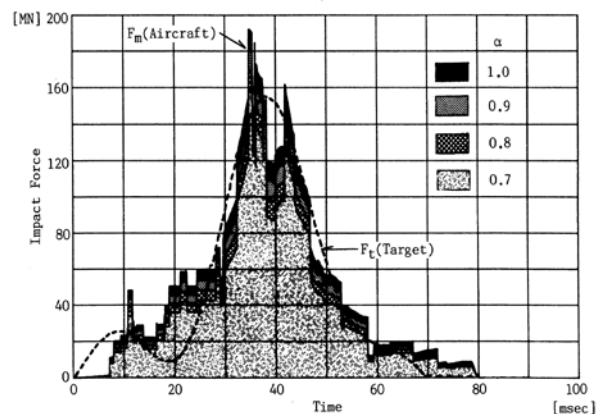


図2 実験計測結果から評価された衝撃荷重⁵⁾

2. 航空機衝突に関する最近の研究動向

原子力発電施設の航空機衝突に関する最近の研究としては解析研究が多数を占めている。中でも、LS-DYNA, AUTODYN, ABAQUS, ADINA等の汎用衝撃解析ソフトを用いた大規模なシミュレーション解析の研究が中心となっている。これらのシミュレーション解析を分類すると、①航空機が剛壁に衝突したときに生じる衝撃荷重を評価する解析、②衝撃荷重時刻歴をターゲットである原子力発電所あるいはその構成部材である壁板に作用させてターゲットの応答・損傷を時刻歴応答より評価する解析(Force-History Method)、③飛翔体である航空機およびターゲットである構造物共にモデル化し、航空機に衝突速度・角度等を与えて両者の相互作用を考慮した衝撃解析手法(Missile-Target Interaction Analysis Method)の3種類に分類される。ここではこれら3種類の解析例のいくつかを紹介する。

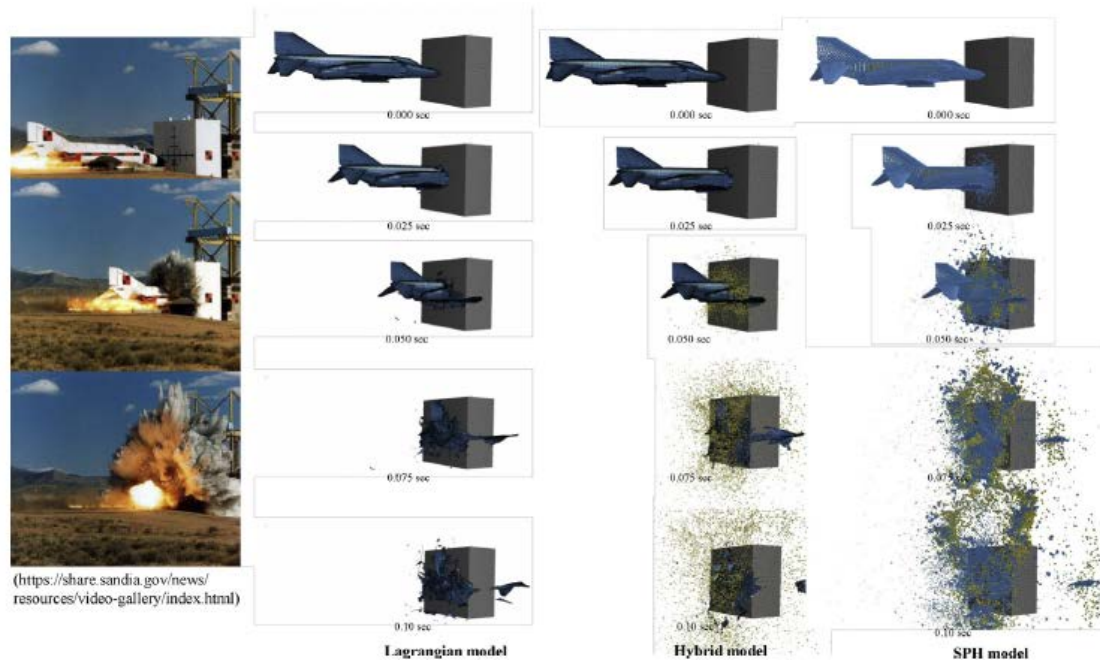


図3 F4-Phantom衝撃実験の3種類のモデル化によるシミュレーション解析結果⁷⁾

① 衝撃荷重の評価解析に関する解析研究例

まず航空機が剛壁に衝突した場合に生じる衝撃荷重評価の解析研究の多くは前述したF4-Phantom戦闘機を用いた実大衝撃実験を対象としてそのシミュレーション解析を実施している。Itoh et al.⁶⁾はAUTODYNを用いて前述のF4-Phantom戦闘機を用いた実大衝撃実験のシミュレーション解析を行った。解析では機体の材料をアルミニウムと設定し、Johnson-Cook Modelを採用し、ターゲットのコンクリートにはRHT Modelを適用して、実験で得られた航空機の破壊状況及び衝撃荷重時刻歴を精度よく評価できることを示している。またLee et al.⁷⁾も同じようにF4-Phantom戦闘機の衝撃実験をLS-DYNAを用いてシミュレーション解析を実施した。ここでは機体も燃料も通常のShell要素でモデル化した Lagrangian Model、機体はLagrangian Modelで燃料はSPH Modelを用いたHybrid Model、機体も燃料もすべてSPH Modelにした3ケースについて解析し、さらに機体の材料のErosionを規定する破壊ひずみの限界値 (Erosion Factor) を数種類に変動させたパラメトリック解析を実施した。図3にこの3ケースの解析モデルによる破壊進展状況のシミュレーション解析結果の比較を示す。さらに前章で示したF4-Phantomの実大衝撃実験結果から導入された衝撃有効質量係数である $\alpha = 0.9$ の妥当性もシミュレーション解析からも評価している。

② Force-History Methodを用いた航空機衝突解析研究例

Abbas et al⁸⁾はRiera Modelを用いて算定されたF4-Phantom、Boeing 707-32およびFB-111戦闘機の剛壁衝突時の衝撃荷重時刻歴を、半球状ドームとその下部の円筒形で構成される原子力発電所の格納容器外壁に作用させた場合の時刻歴動的応答解析を実施し、ドーム部分と円筒形部分の境界位置に航空機が水平に衝突した場合が最も厳しい衝突条件であることを示した。また最近の研究では、Frano and Forasassi⁹⁾は、IRIS型の格納容器構造に、F4 Phantom、Boeing 707、Boeing 747の衝撃荷重を与えて、衝撃解析を実施した。その結果、F4-PhantomよりもBoeing 747のほうがターゲットの与える損傷が大きくなるが、いずれの場合も格納容器の構造安全性は損なわないことが確認されている。

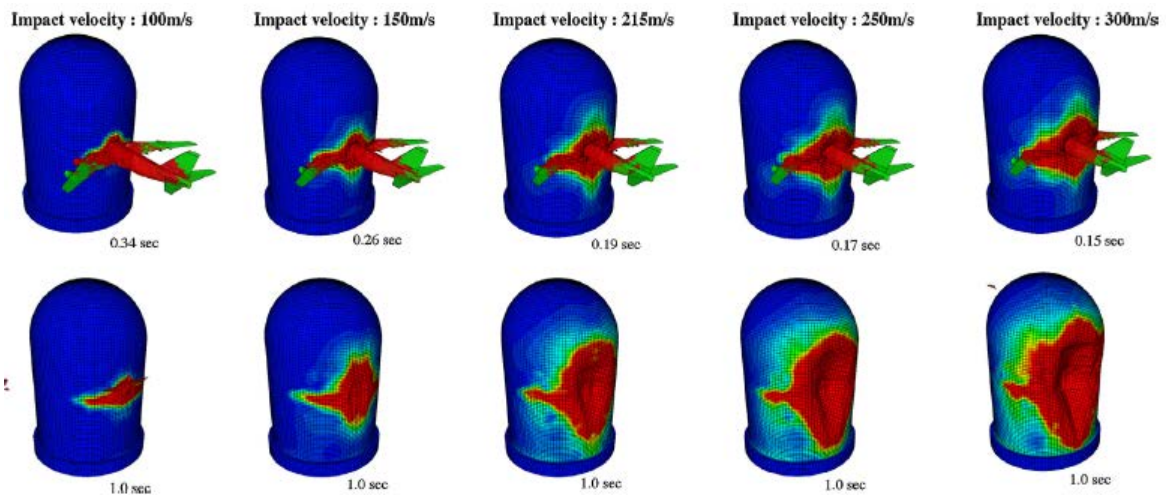


図4 Boeing 747の衝突速度によるPSコンクリート造格納容器の損傷状況の比較¹¹⁾

③ Interaction Methodを用いた航空機衝突解析研究

Jin et al.¹⁰⁾はエンジンの詳細モデルも含めたB767の精緻な有限要素モデルをABAQUSを用いて作成し、格納容器建屋へ衝突したときのミサイル・ターゲットの相互作用を考慮したInteraction Methodによるシミュレーション解析を実施し、局部損傷および全体損傷を評価した。また Lee et al.¹¹⁾はBoeing 747がPSコンクリート造の格納容器に衝突した場合のシミュレーション解析を実施した。解析では、図4に示すように、航空機の衝突速度・角度・位置をパラメータとしたInteraction Methodを用い、それぞれのパラメータが格納容器の損傷に及ぼす影響を検討している。またInteraction Methodから評価される衝撃荷重は、Riera Methodで評価される衝撃荷重よりも小さくなることを示し、Riera Methodが衝撃荷重を安全側に評価する手法であるとしている。なおここで紹介した研究以外に、Interaction Methodによる解析研究は多くの研究者¹²⁾¹³⁾によりなされている。

3. まとめ

以上、高い安全性が要求される原子力発電所施設の航空機衝突に関して、既往研究の概要および最近の研究事例を紹介した。特に、近年の構造解析ソフト技術の進展により、今まで困難であった航空機衝突の衝撃現象の詳細なシミュレーション解析が可能となり、その結果航空機衝突に対する原子力発電所施設の構造安全性が精度よく評価可能となった。

参考文献

- 1 R. P. Kennedy (1976): A Review of Procedures for the Analysis and Design of Concrete Structures to Resist Missile Impact Effects, Nuclear Engineering and Design, No. 37, 183-203
- 2 Q. M. Li, S. R. Reid, H. M. Wen, A. R. Telford (2005): Local Impact Effects of Hard Missiles on Concrete Targets, International Journal of Impact Engineering, No. 32, 224-284
- 3 T. Sugano, H. Tsubota et al. (1993): Local Damage to Reinforced Concrete Structures Caused by Impact of Aircraft Engine Missiles Part 1. Test Program, Method and Results, Nuclear Engineering and Design, No. 140, 387-405
- 4 T. Sugano, H. Tsubota et al. (1993): Local Damage to Reinforced Concrete Structures Caused by Impact of Aircraft Engine Missiles Part 2. Evaluation of Test Results, Nuclear Engineering and Design, No. 140, 487-423
- 5 Sugano T., Tsubota H. et al. (1993): Full-Scale Aircraft Impact Test for Evaluation of Impact Force, Nuclear Engineering and Design, Vol. 140, 373-385
- 6 Itoh M., Katayama M., Rainsberger R. (2005): Computer Simulation of an F-4 Phantom Crashing into a Reinforced Wall, 2nd International Conference on Computational Ballistics, 207-217
- 7 Lee K., Jung J. W., Hong J. W. (2014): Advanced Aircraft Analysis of an F-4 Phantom on a Reinforced Concrete Building, Nuclear Engineering and Design, Vol. 273, 505-528
- 8 Abbas H. et al. (1996): Aircraft Crash upon Outer Containment of Nuclear Power Plant, Nuclear Engineering and Design, Vol. 160, 13-50
- 9 Frano R. L., Forasassi G. (2011): Preliminary Evaluation of Aircraft Impact on a Near Term Nuclear Power Plant, Nuclear Engineering and Design, Vol. 241, 5245-5250
- 10 Jin. B. M. et al. (2011): Development of Finite Element Method of Large Civil Aircraft Engine and Application to the Localized Damage Evaluation of Concrete Wall Crashed by Large Civil Aircraft, Trans. 21th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Div. V, 1-8
- 11 Lee K., Han S.E., Hong J.W. (2013): Analysis of Impact of Large Commercial Aircraft on a Prestressed Containment Building, Nuclear Engineering and Design, Vol. 265, 431-449
- 12 Katayama M., Itoh M., Rainsberger R. (2004): Numerical Simulation of Jumbo Jet Impacting on a Thick Concrete Walls – Effects of Reinforcement and Wall Thickness, In the Second Asian Conference of High Pressure Research, Nara, Japan
- 13 Lee H.K., Kim S.E. (2013): Erosion Sensitivity Assessment of SC Walls under Aircraft Impact, Trans. 22th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Di. V
- 14 J. D. Riera (1968): On the Stress Analysis of Structures Subjected to Aircraft Impact Force, Nuclear Engineering and Design, Vol. 8, 415-426

*Haruji Tsubota¹

¹JAEA