

航空機衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の衝撃応答解析

AIRPLANE CRASH IMPACT ANALYSIS ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURE

白井孝治*, 影山典広**, 片山雅英***, 伊東雅晴****

Koji SHIRAI, Norihiro KAGEYAMA, Masahide KATAYAMA and Masaharu ITO

*工博 (財) 電力中央研究所 上席研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

**工 (財) 電力中央研究所 主任研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

***博 (株) CRC ソリューションズ 技術スペシャリスト (〒136-8581 東京都江東区南砂 2 丁目)

****工 (株) CRC ソリューションズ (〒136-8581 東京都江東区南砂 2 丁目)

キーワード: 鉄筋コンクリート、航空機、衝突解析、LS-DYNA、AUTODYN-3D

(RC Concrete, Airplane, Impact Analysis, LS-DYNA, AUTODYN-3D)

1. はじめに

2001年に米国で発生した同時多発テロ以降、米国を中心に、重要な原子力施設に関して航空機衝突に対する安全性評価が求められている^{1) 2)}。これを受けて、航空機衝突に対する構造評価について、数値解析による評価手法の確立が進められている^{3) 4)}。本論文では、民間航空機のような柔な飛来物が鉄筋コンクリート構造物に衝突した場合の耐衝撃性について数値解析的な検討を実施し、既往の設計評価手法との比較を行った。

解析対象は、スラブ状の鉄筋コンクリート構造体にボーイング747型旅客機が衝突する場合を想定した。解析には、2種類の衝撃解析コード(LS-DYNA、AUTODYN-3D)を用いた。鉄筋コンクリートスラブへの旅客機の衝突速度をパラメータとした衝撃解析を実施し、コンクリートスラブへの衝撃荷重と局部損傷の破壊モードを評価した。さらに、耐衝撃設計において重要であるスラブの裏面剥離等の限界厚さを算定するため、従来の剛な飛来物に対する限界厚さ評価式の低減率を評価した。

2. 衝撃解析の概要

2.1 使用解析コード

本論文では、LS-DYNA、及び AUTODYN-3D の2種類

の衝撃解析コードを用いて解析を行った。これらの解析コードは有限要素法を適用した衝撃解析コードであり、陽解法による非線形動的構造解析を扱うことが可能である。

2.2 解析モデル

解析モデルのメッシュについては、2種類の解析コードで共通とし、旅客機のモデル化には4接点シェル要素を、コンクリートスラブには8接点ソリッド要素を、コンクリートスラブの鉄筋にはビーム要素を用いてモデル化を行った。

(1) ボーイング747型旅客機

旅客機モデルについては、汎用のメッシュ作成用計算プログラム TrueGrid⁵⁾により CRC ソリューションズが作成したモデルの提供を受けて、使用した。旅客機モデルのメッシュ形状を図-1に示す。

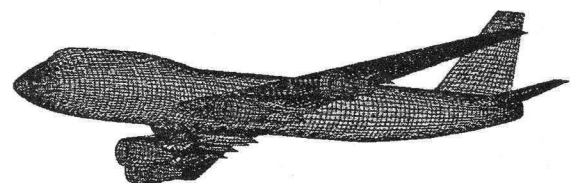


図-1 ボーイング747型旅客機のメッシュ形状

解析モデルの全長は約71m、全幅は約64mである。また、シェル要素の厚さについては、ボーイング747型旅客機の仕様⁶⁾に基づき決定した。航空機全体の重量は約340トンである。この重量には、4基のエンジン(1基あたり約4トン)と燃料(約100トン)の重量を含んでいる。

航空機材料数値モデルとしては、ひずみ速度とひずみ硬化を考慮するため、Johnson-Cookモデル⁷⁾を採用した。また、材料物性はアルミニウム合金(超ジュラルミン、Al2024-T351)とした。使用した材料物性値を表-1に示す。

表-1 旅客機モデルの材料物性値

| | |
|--------|------------------------------------|
| 密度 | $2.785 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ |
| 体積弾性係数 | $7.9 \times 10^4 \text{ MPa}$ |
| 横弾性係数 | $2.76 \times 10^4 \text{ MPa}$ |
| 定数 A* | $2.65 \times 10^8 \text{ Pa}$ |
| 定数 B* | $4.26 \times 10^8 \text{ Pa}$ |
| 定数 n* | 0.34 |
| 定数 C* | 0.015 |

$$*: \sigma_y = \left[A + B \epsilon_p^n \right] \left[1 + C \log \dot{\epsilon} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0} \right)^m \right]$$

(2) コンクリートスラブ

衝突するコンクリートスラブは、幅150m、高さ60m、厚さ3mの長方形とし、メッシュサイズを1.5m×1.5m×0.2mと設定した。また、旅客機と衝突するコンクリートスラブの中心部分(幅60m、高さ30m)については、メッシュサイズを0.5m×0.5m×0.2mと設定した。コンクリートスラブのメッシュ形状を図-2に示す。

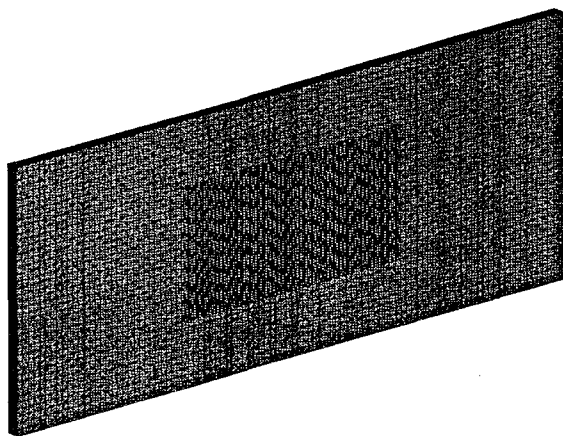


図-2 コンクリートスラブのメッシュ形状

コンクリートの材料数値モデルとして、AUTODYN-3Dの解析モデルでは、圧縮硬化、歪み硬化、歪み速度効果、及び引張り破断に伴う強度低下を模擬できるRHTモデルを使用した。また、コンクリートの材料物性値はAUTODYNの材料ライブラリより、圧縮強度が35MPaとなるよう補正した。

一方、LS-DYNAの解析モデルでは、コンクリートの材料数値モデルを弾塑性体とし、材料物性値としては、密度 2.346 kg/m^3 、ポアソン比0.208、圧縮強度35MPa、静弾性係数 $2.32 \times 10^4 \text{ MPa}$ と設定した。

また、コンクリートスラブは底面のみ全方向拘束とし、他の5面には拘束条件を与えず、自由とした。

(3) 鉄筋

鉄筋は、鉄筋間隔1.5m(長軸方向に99本、短軸方向に39本)となるようにビーム要素でモデル化した。これらの鉄筋は、コンクリートスラブの表面から0.4mのかぶり深さに、衝突側と非衝突側のそれぞれに直交して埋め込まれているものとした。

また、鉄筋はSD345とし、鉄筋径は110mm、鉄筋比を0.8%とした。鉄筋モデルの材料物性値を表-2に示す。

表-2 鉄筋モデルの材料物性値

| | |
|--------|----------------------------------|
| 密度 | $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ |
| 体積弾性係数 | $1.71 \times 10^5 \text{ MPa}$ |
| 横弾性係数 | $7.88 \times 10^4 \text{ MPa}$ |
| 降伏応力 | 215 MPa |
| 伸び | 19 % |

2.3 解析条件

ボーイング747型旅客機がコンクリートスラブに対して垂直に飛来し、スラブ中央に衝突する場合について解析を行った。衝突時の旅客機速度は、ボーイング747型旅客機の着陸時の対地速度約280km/hを若干上回る300km/hに設定した。また、コンクリートスラブの局部損傷に及ぼす衝突速度の影響を評価するため、衝突速度200km/h、150km/h、及び100km/hの場合についても解析を行った。

3. 衝撃荷重評価

3.1 飛来物に対する衝撃設計荷重

航空機の衝突を対象とした耐衝撃設計においては、衝撃の作用時間が剛な衝突体に比べて長く、また荷重の大きさが時間とともに変動することから、衝撃荷重-時間曲線を用いた動的な構造解析の結果に基づいて行われることが多い。

日本の原子力施設では、たとえば六ヶ所村の再処理施設における耐衝撃設計用の衝撃荷重として、F-16 戦闘機をもとに、さらにこれに余裕をみた防護設計用航空機により、衝撃荷重を定めている⁸⁾。防護設計用航空機は、総重量 20 トン、コンクリート壁への衝突速度は 150 m/s (≒540 km/h) と設定されている。

また、海外でも同様に、種々の航空機の各種飛行条件について衝撃荷重曲線が求められている⁹⁾。旅客機の例として、ボーイング707型旅客機(総重量約 150 トン)の設計用荷重時間曲線を示す。このときの衝突速度は、103 m/s (≒370 km/h) である。

上記2種類の航空機衝突に対する荷重時間曲線について、図-3 にあわせて示す。

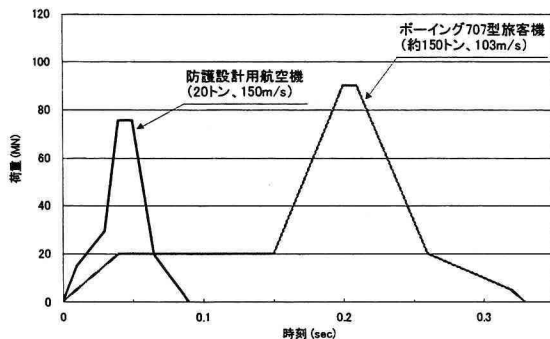


図-3 航空機衝突に対する荷重時間曲線^{8) 9)}

3.2 衝撃応答

コンクリートスラブとの衝突解析に先立ち、本旅客機モデルの与える衝撃荷重特性を確認するため、LS-DYNA コードを用いて剛体壁へ衝突(衝突速度 300 km/h≒83.3 m/s)させた場合の衝撃荷重-時間曲線を求めた。得られた衝撃荷重曲線を図-4 に示す。

本解析モデルの衝撃荷重曲線の特徴として、航空機の変形状態の変化に伴い、荷重のピークが2つあることが挙げられる。航空機の変形履歴を図-5～図-7 に示す。

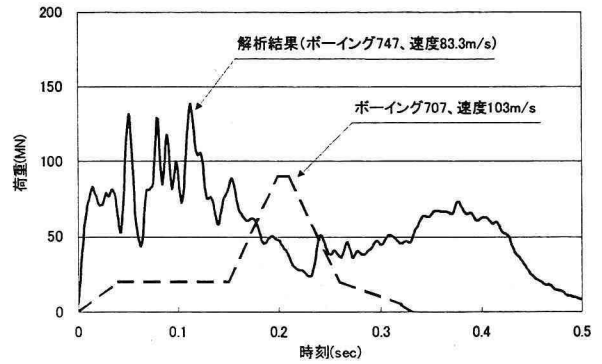
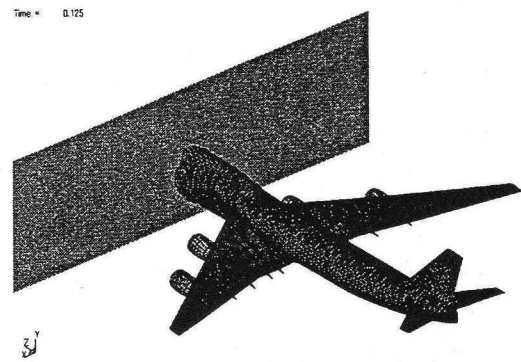


図-4 旅客機の衝撃荷重-時間曲線



(衝突直後: 0.125sec 後)



(衝撃荷重ピーク時: 0.225sec 後)

図-5 航空機の変形状態

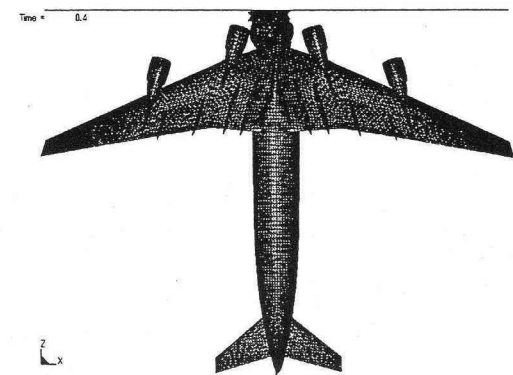


図-6 主翼の変形状態(下面より、0.4sec 後)

Time 0.5

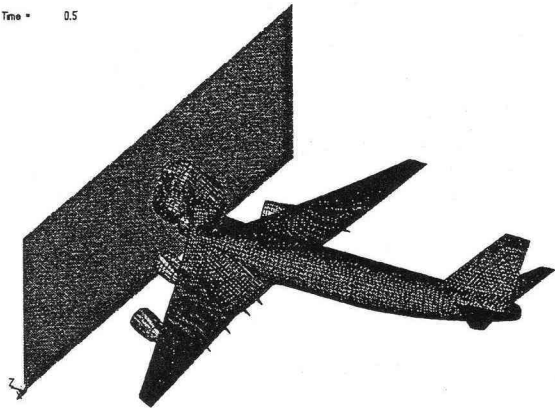


図-7 最終変形状態(0.5sec後)

はじめの荷重ピーク(0.1sec前後)は、航空機の機首が変形する過程で荷重が発生したもので、機首が全体的に座屈するのに伴い荷重は減少する(図-5)。次に、機首部分の変形が限界に達して主翼及びエンジン部が衝突するに従い(図-6)、2番目のピークが現れる。

また、この荷重曲線を前述したボーイング707型旅客機の場合と比べると、衝突速度の違いにより現象時間、荷重のピーク時間がずれている。荷重ピークの出現傾向も異なるが、これは、両旅客機の機体構造の違いや、全体重量に占めるエンジン部重量の割合が異なるためと考えられる。両旅客機の重量の比較を表-3に示す。

表-3 旅客機重量の比較

| 旅客機型式 | 総重量 | エンジン部重量 |
|-------|--------|---------|
| 747型 | 約340トン | 4トン×4基 |
| 707型 | 約150トン | 8トン×4基 |

3.3 コンクリートスラブへの衝突

衝突対象をコンクリートスラブとした場合について、LS-DYNAによる解析結果とAUTODYN-3Dによる解析結果との比較を図-8に示す。

衝突対象をコンクリートスラブとした場合でも、航空機の変形挙動は剛体壁に衝突した場合とほとんど相違は認められないが、コンクリートスラブの変形によるエネルギー吸収により、発生する衝撃荷重の傾向は異なっている。コンクリートスラブへの衝突では、はじめの荷重ピーク(約130MN)の発生が遅れ、一旦0MN付近まで荷重が減少した後、2番目

のピーク値(約160MN)がはじめのピークよりも高い値で立ち上がっている。

また、AUTODYN-3Dの解析結果は、ピーク荷重の大きさはLS-DYNA同等であるものの、発生時刻はLS-DYNAの場合に比べて早く、2番目のピーク荷重の大きさが小さくなっており、同種の材料特性を用いても、解析コードの特性により衝撃荷重が異なる結果となった。ただし、本解析条件では、後述するコンクリートスラブの最大応力は、航空機の変形が小さく受圧面積が小さい1番目のピーク時に発生しているため、局部損傷評価においては、解析コードの違いによる差異は生じにくいと考えられる。

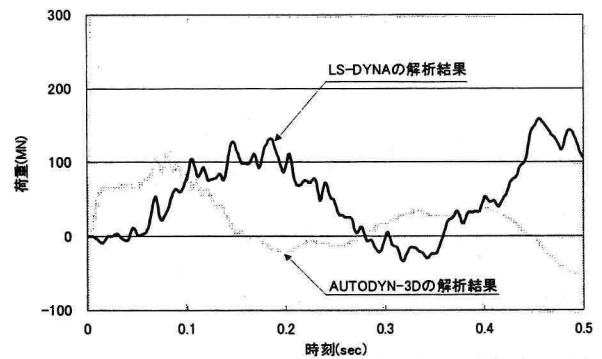


図-8 衝撃荷重の比較

4. 局部損傷の評価

4.1 鉄筋コンクリートスラブの破壊モード

飛来物が鉄筋コンクリート構造物に衝突するときの破壊モードは、図-9のように局部損傷と全体破壊に分類される。

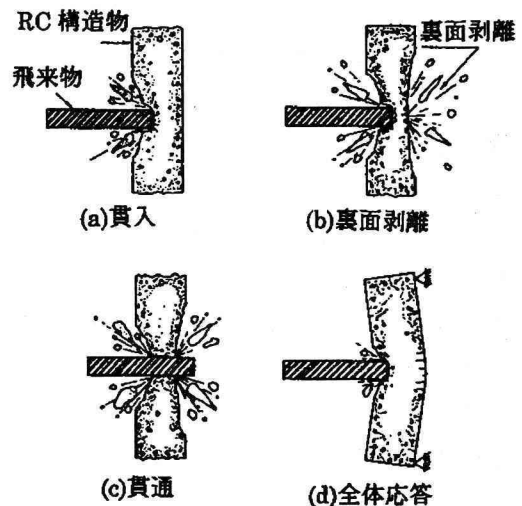


図-9 スラブの破壊モード

一般に、局部損傷は飛来物が高速度で衝突したときに発生し、衝撃エネルギーの大部分が構造物によって局部的に吸収されたために損傷の範囲が衝突部付近に集中する。すなわち、衝突速度が比較的遅い場合には、飛来物が貫入することによって衝突面ではコンクリートの表面飛散、裏面では曲げあるいはせん断ひび割れが発生する。飛来物の衝突速度が速くなると貫入は深くなり、コンクリート内部の引張応力により裏面剥離が発生し、さらに衝突速度が速くなると飛来物の貫通が起こる。

4.2 裏面剥離限界厚さの評価式

裏面剥離に対する限界厚さ t_s の評価式として、CRIEPI 式を適用した。この式は、鉄筋コンクリートスラブに飛来物が衝突したとき、スラブ裏面に圧縮曲げ応力が生じるような限界の円周において最大曲げモーメントが生じて、スラブは曲げ降伏するものと仮定し、この変形によるエネルギーと飛来物の運動エネルギーの釣り合いから導かれた Chang 式¹⁰⁾に対し、修正係数を乗じて算出された¹¹⁾ものである。

$$t_s = \alpha_s \times \left\{ \frac{V_0}{V} \right\}^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{d^{0.2} f_c^{0.4}} \dots (1)$$

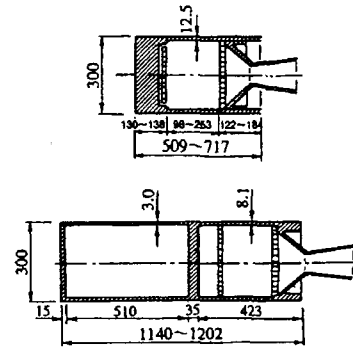
ここで、 V_0 ：基準速度 (60.96 m/sec)、 V ：衝突速度 (m/sec)、 M と d はそれぞれ飛来物の質量 (kg) と直径 (m)、 f_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)、係数 α_s は既往の実験¹¹⁾ から、 $\alpha_s = 6.96 \times 10^{-3}$ である。

4.3 柔飛来物に対する低減率

飛来物の剛性が小さい場合とその運動エネルギーが自身の変形によって吸収され、鉄筋コンクリート構造物への衝撃作用が減少すると考えられる。

大沼ら¹²⁾ は、柔・剛の2種類の模擬飛来物を鉄筋コンクリート試験体に衝突させて、裏面剥離限界厚さと貫通限界厚さを評価する算定式について検討している。ここで、剛飛来物に対しては、CRIEPI 式によりスラブの裏面剥離限界と貫通限界厚さを安全かつ精度よく評価できることが確認されており、また、柔飛来物に対しては、図-10 に示すように、柔飛来物に対して CRIEPI 式を用いる場合の必要スラブ厚さの低減率（裏面剥離厚さ：RF_s、貫通限界厚さ：RF_p）についての検討がなされ、裏面剥離限界に対して

は RF_s = 0.7 が提案されている。



模擬飛来物（上：剛、下：柔）¹²⁾

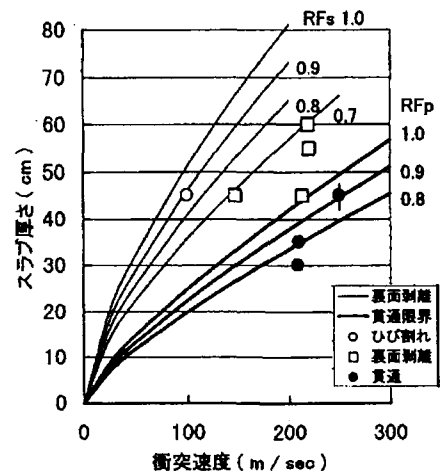


図-10 柔飛来物に対する局部損傷と低減率¹²⁾

4.4 コンクリートスラブ表面の応力

柔飛来物の低減率を考慮した CRIEPI 式について、ボーイング747型旅客機の寸法・重量に基づく裏面剥離限界厚さを求めると、旅客機の速度が約 47.3m/sec (≒170km/h) の場合に、裏面剥離限界厚さが本解析のコンクリートスラブの厚さである 3m と等しくなる。

ここで、旅客機の衝突速度を 100km/h、150km/h、200km/h 及び 300km/h とした LS-DYNA の解析結果について、コンクリートスラブ非衝突面での衝突方向の最大引張応力を表-4 にまとめる。また、AUTODYN-3D の解析結果より、衝突速度 300km/h でのコンクリートスラブ非衝突面の損傷度分布図を図-11 示す。

表-4 において、コンクリートスラブの衝突方向最大引張応力はコンクリートの引張強度を十分下回っている。また、図-11 において、コンクリートの損傷率は最大 30% 程度（損傷率 100% でせん断変形に対する抵抗力喪失）であり、解析中に損傷率の進展もみられないことから、衝突速度 300km/h でも裏

面剥離は生じていないと考えられる。

したがって、ボーイング747型旅客機のコンクリートスラブへの衝突に対して、CRIEPI式による限界厚さ評価式は、柔飛来物に対する既往の実験条件における低減率を考慮したとしても、十分安全側な評価を与えると考えられる。

表-4 コンクリートスラブ非衝突面の最大引張応力

| 旅客機の衝突速度 | 最大引張応力 |
|-------------|-----------|
| 100 km/h | 0.069 MPa |
| 150 km/h | 0.160 MPa |
| 200 km/h | 0.165 MPa |
| 300 km/h | 0.224 MPa |
| コンクリートの引張強度 | 約 2.9 MPa |

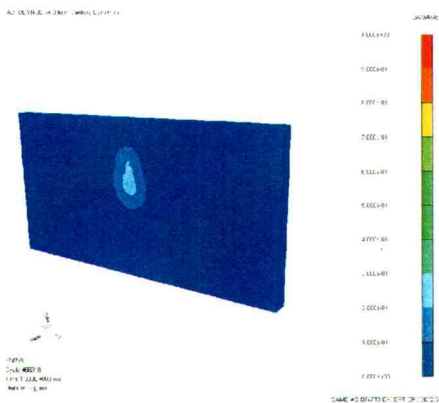


図-11 コンクリートスラブ非衝突面の損傷状態

5. まとめ

- (1) ボーイング747型旅客機の剛な衝突面への衝撃応答解析を行い、衝撃荷重の特性を把握し、既往の設計荷重曲線との比較・検討を行った。さらに、衝突速度や解析コードの種類をパラメータとした評価を行い、解析結果に及ぼす影響を把握した。
- (2) コンクリートの局部損傷評価式(CRIEPI式)は、ボーイング747型旅客機の衝突によるコンクリート構造物の局部損傷に対して、十分に安全側な評価を与えると考えられる。

参考文献

- 1) Nuclear Energy Institute: Detering Terrorism: Aircraft Crash Impact Analyses Demonstrate Nuclear Power Plant's Structural

Strength, Dec. 2002.

- 2) 経済産業省 原子力安全・保安院: 実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価について, July, 2002
- 3) 片山雅英、伊東雅晴、田村茂之、別府万寿博、大野友則: 高速衝突と爆発を被る鉄筋コンクリート構造物の変形破壊挙動の数値解析法, 計算工学講演会論文集, Vol.9, March, 2004
- 4) Itoh, M. et al: Computer Simulation of a Boeing 747 Passenger Jet Crashing into a Reinforced Concrete Wall, First International Symposium on Explosion, Shock Wave and Hypervelocity Phenomena, (2004)
- 5) XYZ Scientific Applications Inc.: TrueGrid User Manual, Version 2.1, (2001).
- 6) Boeing 747 Family: Technical, <http://www.boeing.com/commercial/747family/technical.html>
- 7) G. R. Johnson and W. H. Cook: A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures, Proc. 7th Int. Sympo. Ballistics, (1983), p.541
- 8) 科学技術庁パンフレット: 航空機に対する安全性について(使用済燃料の受入れ施設及び貯蔵施設)
- 9) H. Kamil et al.: Analyses of Critical Structures and Contained Equipment for Aircraft Impact Loadings, Trans. Of the 5th Int. Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. J, 1979
- 10) Chang, W. S.: Impact of Solid Missiles on Concrete Barriers, J. of the SR Division of ASME, Vol.106, No.ST2, pp.257-271, Feb. 1981.
- 11) 大沼博志、伊藤千浩、佐藤宏一、高野博: 鉄筋コンクリートスラブの衝撃応答特性および有限要素法による解析, 電中研研究報告No.384027, 1985.4
- 12) 大沼博志、伊藤千浩、白井孝治: 剛・柔飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の局所損傷評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, 1998