

## 建築物への航空機衝突による衝撃荷重

### IMPACT LOAD SUBJECTED TO AIRCRAFT CRASH ONTO BUILDINGS

河西良幸\*

Yoshiyuki Kasai

\*工博 前橋工科大学教授 工学部建築学科 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460-1)

キーワード：世界貿易センタービル、航空機、衝突、衝撃荷重  
(World Trade Center, Aircraft, Building, Crash, Impact Load)

#### 1. はじめに

現代社会には高速運動に伴う現象が数多く発生し、自動車、航空機、船舶が土木・建築構造物に衝突する現象<sup>1)</sup>は多数発生しているが、2001年9月11日に米国ニューヨークとワシントンで発生した同時多発テロでの建物への航空機の衝突<sup>2)</sup>は、従来の想定をはるかに超えたショッキングな事件であった。特に世界貿易センター(World Trade Center、以下WTCと略す)2棟への航空機の衝突とその後の崩壊、それに続く周辺建物の崩壊・半壊については、その原因が多くの識者により推測されている<sup>3), 4)</sup>が、従来の衝撃工学や構造工学の知見で定量的に説明しうるかどうかは重要な検討課題である。そのためには、航空機衝突時の衝撃荷重の大きさや性質をできるだけ正確に評価しておくことでまず必要になる。

そこで、本報では、建物への航空機の衝突に関わる既往の研究・調査内容を取り上げ、航空機が建物に衝突する際の衝撃力評価に関わる事項について述べるとともに、WTCへの航空機衝突の際の衝撃荷重の評価を試みた。

- ①建物への航空機の衝突事例
- ②同時多発テロでの航空機衝突時の挙動
- ③衝撃荷重による構造部材の損傷の評価
- ⑤衝撃荷重による構造物の応答性状
- ⑥WTCビルへの航空機衝突時の衝撃荷重

#### 2. 航空機の建物への衝突事例

民間航空機の事故に関しては、外山智士氏のホームページ「民間航空データベース」<sup>5)</sup>に詳しい。軍用機の事故データについては、文献<sup>6)</sup>に記載があるが、インターネットでの軍用機データベースは見当たらない。航空機の建物への衝突事故として次の事例があげられる。

・1945年7月のニューヨーク・エンパイアステートビ

ル78階に衝突<sup>7)</sup>した。B25爆撃機が濃霧の中を飛行中建物に衝突し、20ft (6m) の孔をあけて建物を貫通し、大規模な火災が発生したとのことである。

- ・1968年6月に米空軍のF4ファントム機が九州大学の大型電子計算センターに墜落炎上した。近くの米軍板付基地に着陸しようとした事故で、日曜日の夜の事故で死傷者はなかったとのことである。
- ・1977年9月には、F4ファントム機が横浜市の緑区の宅造地に墜落し、近くの民家の火災により子供が亡くなった。
- ・1987年10月にインディアナポリスにおいて、A-7D コルセアという小型の戦闘機がエンジンの推力を失って近くの飛行場に着陸しようとして、鉄筋コンクリート造7階建てのホテルRamada Innのエントランス屋根に突っ込んだ。衝突直後、爆発とともに大規模な火災が発生し、死者は計9人、全員がホテル内にいた人である。
- ・1992年10月のアムステルダムでのボーイング747の墜落事故<sup>8)</sup>では、航空機が10階の高層アパートに墜落し、乗員3名、乗客1名、アパートの住民47名が死亡した。衝突部分は1階から屋上まで瞬時に崩壊したとのことである。
- ・2000年7月には、コンコルドがフランスパリのシャルルドゴール空港を離陸2分後にパリ北方20km、シャルルドゴール空港から南西6kmのホテルの別館レストラン付近にコンコルドが墜落し(図1 The Associated Press 参照)、乗員・乗客計109名の他に墜落現場のホテル付近にい



図1 コンコルドが墜落した建物

た4名が死亡し、10名以上が負傷した。

- 2001年9月11日の同時多発テロにおいてハイジャックされた2機の旅客機(ボーイング767)が世界貿易センタービルの2棟に衝突した。大規模な火災が発生して1時間ほどで倒壊した。
- 2002年1月5日、米フロリダ州タンパ市内で15才の地元高校生が操縦する小型機セスナ172Rが42階建て高層ビルバンク・オブ・アメリカの28階部分に衝突(図2 AP Photo 参照)した。小型機は胴体の前半部分だけがビルの窓に突っ込み、左右の主翼は激突の際にもぎ取られて地上に落下した。

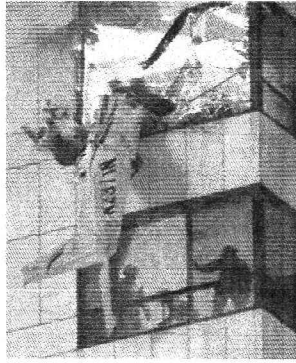


図2 セスナ機の衝突

このように、航空機が直接建物に衝突する事例の数は少ないとはいえ、民間航空機や軍用機の墜落事故は航空機データベース<sup>3)</sup>に見るように世界中では相当な数に及んでおり、建物への航空機衝突の可能性は常にありうると理解しておく方が良く考える。

### 3. 同時多発テロでの航空機衝突時の挙動

ここでは、2001年の同時多発テロでの航空機衝突に関する若干の分析結果について示す。図3はWTCビルへの航空機(ボーイング767)の北棟の衝突面と南棟の衝突面の対面の写真(NHK)を示したものである。北棟の衝突面では、航空機の胴体や翼の形状に孔があいており、側面にも損傷がみられる。南棟では、衝突面の対面において航空機の先端が一部突出した部分が写真に示されている。南棟の側面には航空機の翼でせん断されたように大きな損傷が生じている。図4は国防総省への航空機(ボーイング757)の衝突面の写真(NHK)を示す。ほぼ

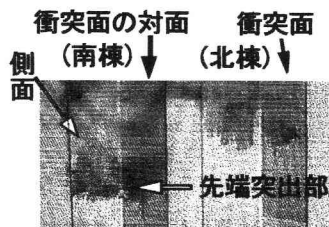


図3 WTCの衝突状況

円形の貫通孔があいており、人間の大きさから判断すると、直径3.5m程度の大きさであることがわかる。

今回の同時多発テロでは、いくつかのアンクルからのWTCビル南棟への航空機の衝突映像が報道されているが、図5のような映像から航空機のWTC南棟への衝突時の航

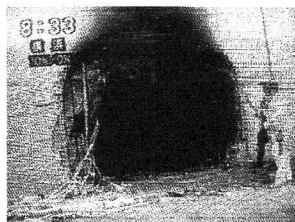


図4 国防総省の衝突状況

空機位置と時刻の関係を読み取り、図6に示す。

読み取りのためのビデオは30コマ/秒で記録されているものとして、比較的追跡しやすい航空機の最後尾位置を2コマお

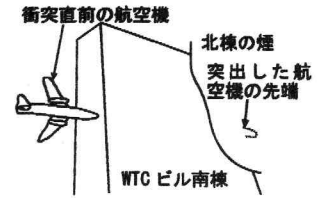


図5 映像の模式図

きにプロットしたものである。読み取りの際の長さの基準は航空機の長さ(48.5m)とした。図5及び他の同種の映像から衝突直前の航空機の衝突速度を讀んでみると、低めの速度が得られるが、前根明・元国際線パイロットは、WTCビル南棟への航空機の衝突速度を確信をもって650km/h(180m/s)と評価(フジテレビ)しているので、その衝突速度180m/sで図6の移動距離と経過時間の関係を調整した。また航空機の先端が建物に衝突した瞬間の映像は航空機のやや後方側からのものであるため、若干の誤差はありうる。図には比較的捉えやすい「垂直尾翼が建物に衝突」した時刻を記載した。図6によると、航空機の先端が建物に衝突しても移動距離の時間変化の度合、即ち、航空機の速度はほとんど変化していないことがわかる。

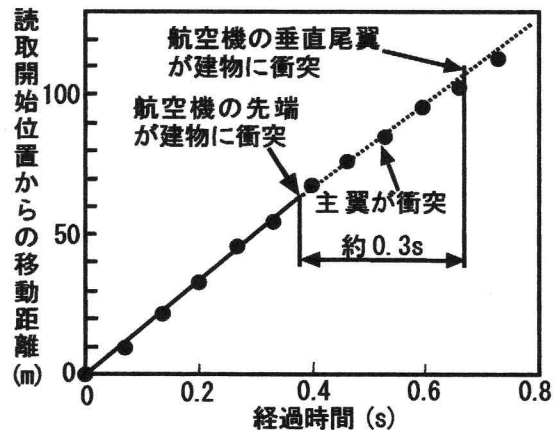


図6 航空機の移動距離と時間の関係

映像によると、航空機の先端が建物に衝突してから、胴体部分が突入していき、主翼が胴体から分離・飛散することなく、あたかも何の抵抗もないかのように建物内に突入している。この挙動が、図3の北棟の衝突面の写真にみるように胴体と主翼の形状がわかるような貫通孔の形状を残し、図6のように航空機が建物に衝突する前と後で速度の変化がない結果につながっていると考えられる。航空機が完全に建物に突入してからまもなく、建物側面(図3の側面)に主翼によって発生したと思われる4個ほどの孔があき、それが繋がっていく形で損傷が広がり、やがて航空機の先端が建物から突出(図3および図5の先端突出部)していく。先端部の速度は、映像から見ると、せいぜい数十m/s程度の低い速度と思われる。図3の写

真を見ても南棟の側面が相当の損傷を受けているが、北棟の側面も相当な損傷を受け、また図3の写真に現れない他の側面の損傷も甚だしいので、衝突を受けた階の近傍では、外フレームのかなりの部分の柱は損傷を受けていると判断される。

#### 4. 衝撃荷重による構造部材の損傷の評価

ここでは、航空機が衝突したような場合の衝撃荷重が作用した際の構造物の損傷について示す。

##### (1) 鉄筋コンクリート板

飛来物が鉄筋コンクリート(RC)構造体に衝突した際の損傷は図7に示すように局部損傷と全体損傷に分類される。局部損傷は飛来物が固い場合に生じ、衝突速度、質量、剛性・強度、断面積、先端の形状に応じて、貫入、裏面剥離、貫通の損傷がある。これらの損傷の限界厚さ(損傷が生ずる場合と生じない場合の境界の厚さ)の評価式は既に各種提案<sup>9)</sup>されている。

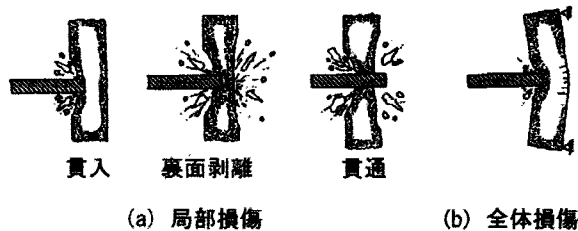


図7 RC構造部材への飛来物衝突による損傷

一方、全体損傷は、質量が大きな飛来物が衝突した場合に生ずる損傷である。飛来物が水のように強度が無くても生ずる現象である。この飛来物衝突による構造体の健全性の検討は、飛来物衝突時の衝撃荷重時刻歴を構造体の有限要素モデルに作用させて計算したり、飛来物と構造体とともに個別要素のようなモデルとして時々刻々の解析<sup>9)</sup>を行って、全体損傷が生じないことを確認する。

その場合、全体損傷には、鉄筋が引張で破断したり、コンクリートが圧壊する曲げ破壊と、コンクリートがコーン状に押し抜かれるせん断押し抜き破壊(パンチングシア破壊)がある。個別要素法では、曲げ破壊とせん断押し抜き破壊が考慮されているが、有限要素法では、せん断押し抜き破壊の評価が難しい。したがって、有限要素法による場合には、その構造体がせん断押し抜き破壊しないことを確認した上で、曲げ破壊しないことを確認する必要がある。

せん断押し抜きのチェックには、次の評価式<sup>10)</sup>が参考になる。これは、柔らかい衝突物体の貫通と裏面剥離を簡易に評価する方法である。衝突物体による平均的な衝撃荷重 $F_{av}$  (N)がRCスラブの動的せん断押し抜き強度 $F_p$  (N)を超えたとき貫通、RCスラブの動的裏面剥離強度 $F_s$  (N)を超えたとき裏面剥離と評価する。

$$F_p = 8170(Rf_{cu})^{1/3} \pi T(D + 2.5T)$$

$$F_s = 7040(Rf_{cu})^{1/3} \pi T(D + 2.5T)$$

$$F_{av} = \frac{0.9I}{T_{90}}$$

ここで、R:二方向の平均的な引張鉄筋比(%),  $f_{cu}$ :一辺150mmの立方体のコンクリート強度(Pa)、T:RCスラブの有効高さ(m)、D:航空機の有効直径(m)、I:柔らかい飛来物の衝突による力積(N·s)、 $T_{90}$ :柔らかい飛来物の衝突による力積の90%に達する時間(s)である。典型的な戦闘機の正面垂直衝突による平均的な衝撃荷重 $F_{av}$  (N)は簡略化された方法で求められるとして、次式で求められることができるとしている。

$$F_{av} = 15.5M^{2/3}V_i^{1.62}(N)$$

ここで、M:航空機の質量(kg)、 $V_i$ :航空機の衝突速度(m/s)

この評価式については、筆者が文献11)の実験に適用し、かなり良い対応を示すとの感触を持っている。

##### (2) 鋼板

鋼板に対する飛来物の衝突実験と破壊に関する研究も従来から多数なされており、Jacob de Marre式、BRL式、SRI式などが知られている。それらは貫通限界に関する実験が大部分であるが、破損限界にも注目した実験がなされている。千葉ら<sup>12), 13)</sup>は、圧力容器用鋼板の破損限界の解明を目的に、剛飛来物による鋼板の衝撃実験を行っている。図8に示すように先端が円柱状、半球状及び円錐状の飛来物に対して適用できる鋼板の破損限界エネルギー評価式を提案している。

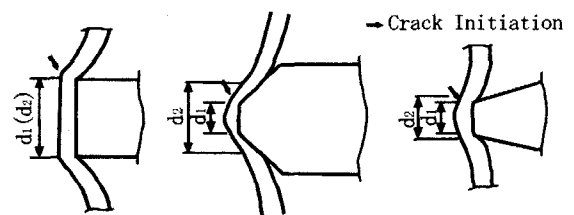


図8 各種飛来物による鋼板の損傷状況<sup>11)</sup>

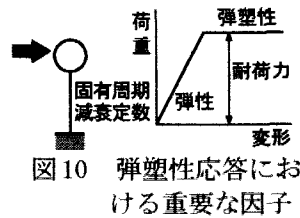
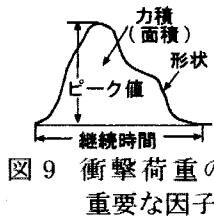
##### (3) 鋼製ライナー付き鉄筋コンクリート板

鉄筋コンクリート板の裏面に鋼製ライナーを設置した場合の貫通、穿孔、膨らみなどの限界厚さの評価式については、文献<sup>14)</sup>に報告されている。

#### 5. 衝撃荷重による構造物の応答性状

本章では衝撃荷重に対する構造物の応答性状について述べる。図9は衝撃荷重の重要な因子を示したものである。衝撃荷重の重要な因子としてピーク値、継続時間、力積、形状がある。構造物の応答に及ぼす重要な因子としては、図10に示すように構造物の固有周

期、減衰定数、弾性・弾塑性、構造物の耐荷力と衝撃荷重のピーク値の大小関係などがある。ここでは、衝撃荷重と構造物応答の代表的な因子について述べる。



(1) 弾性応答

図11は衝撃荷重の継続時間と構造物の固有周期の比に対する衝撃倍率の関係を示したもので、構造物の減衰定数が0の場合の解析結果<sup>15)</sup>を元に筆者が加筆修正したものである。図の横軸は衝撃荷重の継続時間 $\tau$ と1質点(図10参照)の弾性時の固有周期 $T$ との比 $\tau/T$ を示したもので、横軸の右方になるにしたがって継続時間 $\tau$ が小さく、衝撃荷重が短時間に作用することを示している。縦軸は衝撃荷重が作用した場合の構造物の応答変位 $\delta$ を示したものであるが、矩形波形の衝撃荷重のピーク値 $F_R$ が静的に作用した場合の変位 $\delta_s$ で割って基準化し、いわゆる衝撃倍率として示している。図の中には4つの曲線が示されているが、図中の模式図に示すように、矩形波、正弦波、減衰正弦波(正弦波形のピーク以降が減衰している波形)、純粋正弦波(正弦波形であるが、継続時間 $\tau$ が限りなく短い波形)の場合の衝撃倍率を示したものである。この4つの衝撃波形の形状は異なるが、力積(衝撃波形の面積)が同じという共通性がある。

まず実線は矩形波形の衝撃荷重(a)が作用した場合の衝撃倍率として示したもので、 $\tau/T$ が $1/2$ 弱以上では、衝撃倍率 $\delta/\delta_s$ が2であり、衝撃的に荷重を作用した場合には静的に作用した場合に比べて2倍の変位が生ずることを示している。正弦波形(b)や減衰正弦波形(c)の場合には、衝撃倍率のピーク値を示す

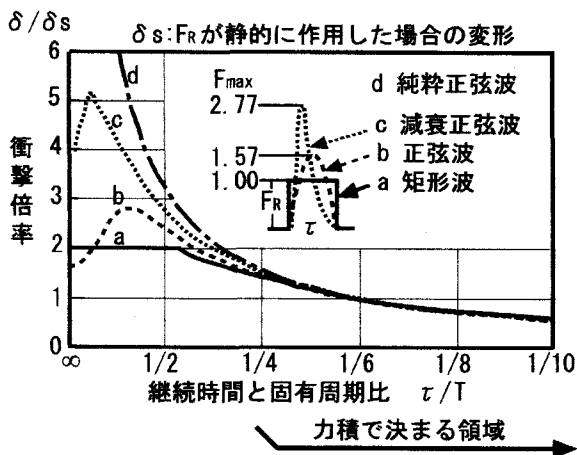


図11 弾性応答における衝撃倍率 (文献15)に加筆・修正)

$\tau/T$ が存在する。この図での衝撃倍率は矩形波形の場合(a)より大きいが、正弦波形の衝撃荷重による衝撃倍率のピーク値(2.75)においては、正弦波形の衝撃荷重のピーク値( $F_{max}=1.57$ )が静的に作用した場合の変位に対して $2.75/1.57=1.75$ となっており、2を越えていないことがわかる。減衰正弦波形の衝撃荷重の場合も同様に2を越えていない。

以上から、衝撃応答<sup>16)</sup>に及ぼす衝撃荷重の形状の影響として、矩形波形は正弦波形や減衰正弦波形より厳しいと言える。なお、純粋正弦波形(d)の場合には、 $\tau/T$ が増加するとともに、衝撃倍率が著しく増加しているが、純粋正弦波形の衝撃荷重のピーク値 $F_{max}$ も非常に大きくなっているため、純粋正弦波形の衝撃荷重のピーク値 $F_{max}$ が静的に作用した場合の変位に比べると2以下になっている。

いずれの波形の衝撃荷重の場合とも $\tau/T$ が $1/4$ より小さくなっていくと、衝撃荷重の形状にはよらずに同じ衝撃倍率になっている、衝撃応答が力積で決まる領域で、武藤博士が「力積破壊の世界<sup>17)</sup>」と述べた領域の現象である。

(2) 弾塑性応答

次に構造物が弾塑性応答を示す場合について図12に示す。文献<sup>18)</sup>に示されている図を図10と対応できるように筆者が横軸を変換し、また、パラメータ $R_m/F_m$ についても取捨選択している。横軸には図11と同じように、正弦波形の衝撃荷重の継続時間 $\tau$ と弾性時の1質点の固有周期 $T$ との比 $\tau/T$ を示し、縦軸は1質点の弾塑性応答の最大変位 $X_m$ と弾性時の限界変位 $X_{el}$ との比、いわゆる変位塑性率 $\beta = X_m/X_{el}$ を示したものである。構造物をモデル化した1質点の復元力特性は図10及び図12の模式図に示すように完全弾塑性としている。解析でのパラメータとしては、1質点の構造物の耐荷力 $R_m$ と正弦波形の衝撃荷重の最大値 $F_m$ の比 $R_m/F_m$ を0.2から2.2まで変化させている。 $R_m/F_m$ が1.6の場合には $\tau/T=0.8$ 程度で、変位塑性率 $\beta$ が1を越えて弾性限界変位 $X_{el}$ を越えるが、 $R_m/F_m$ が1をはるかに上回る2.0ないし2.2では、 $\beta$ が1を下回って弾性範囲内にあることを示している。 $R_m/F_m$ が0.95以下になると、 $\beta$ が10に近い値となる $\tau/T$ が存在するようになり、 $R_m/F_m$ が0.8以下では、 $\tau/T$ が大きくなるとともに、変位塑性率 $\beta$ は著しく大きくなっていき、 $\beta$ が容易に10を越えるようになる。実際の現象では、ある変位塑性率を越えると、全体損傷(図7参照)が発生することになると言える。この全体損傷が生ずる変位塑性率 $\beta$ の大きさとして米国の基準<sup>19)</sup>では $\beta > 30$ とする規定もあるが、構造体の種別や形状、配筋などの特性によって変化すると考えられるので、一律には決めがたい。

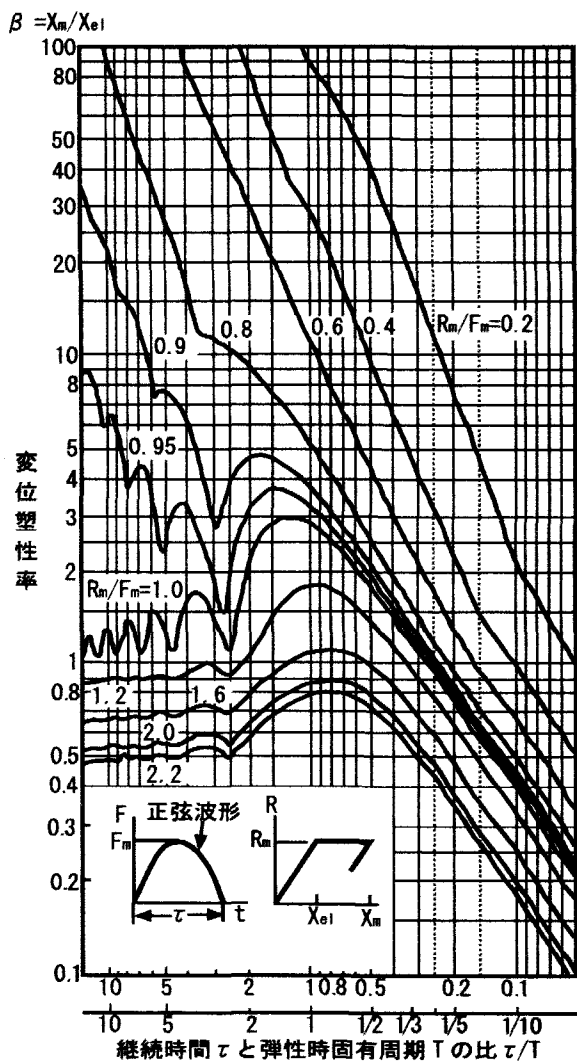


図12 正弦波形の衝撃荷重に対する変位塑性率 (文献18)に加筆修正

## 6. WTCビルへの航空機衝突時の衝撃荷重

同時多発テロ時に航空機がWTCビルに衝突した際の衝撃荷重がどの程度の大きさで性質であったかを知ることは今後の各種評価の際に非常に重要である。そこで、WTC南棟への航空機衝突時の衝撃荷重を試算してみた。今回の航空機衝突時には、図6に見たように、航空機が建物に衝突した際の航空機の減速が少ないので、航空機衝突時の建物の抵抗は小さいことを示している。つまり航空機が建物に衝突した際の衝撃力は、剛体のように固定して変形しない物体に衝突する場合の衝撃力に比べてかなり小さくなると考えられる。図12に見たように、耐荷力 $R_m$ の小さな構造物に大きな衝撃力 $F_m$ が作用すると、構造物の変形 $X_m$ が非常に大きくなり、実際にはその変形に耐えられずに飛来物が貫通することとなる。そこで、ここでは、WTC南棟への航空機が剛体に衝突した場合の基本的な衝撃荷重を評価してみる。

その場合、航空機の質量と衝突速度が最も重要なデータである。まず質量の評価であるが、WTC南棟に

衝突したボーイング767-200については、ボーイング社のホームページによると最大離陸質量127~143tである。ロバートソン氏<sup>9)</sup>は質量170t、読売新聞(2001年9月13日朝刊)は190tとの記載もあるが、ボーイング社によるデータの信頼性が高いと考え、前記の質量を採用することとする。但し、最大離陸質量で飛行することはないと考えられるので、ここでは質量140tとして評価する。

衝突速度については、2. で述べたように前根氏の評価による650km/hを採用して180m/sとする。

以上の基本データの他に航空機の質量分布や破壊強度分布も本来必要であるが、実物航空機の衝撃実験結果<sup>10)</sup>から、航空機の破壊強度の影響は比較的少なく、衝撃荷重の形状は質量分布の形状に類似するとの知見を利用して、次のように設定する。

- ①航空機の質量分布は三角形分布に近いものと仮定して衝撃荷重分布を三角形とする。
- ②航空機の保有する運動量 $mv$  ( $m$ :質量、 $v$ :衝突速度)が力積に変換するものとする。
- ③衝撃荷重の継続時間 $\tau$ は航空機の衝突による減速がないものとして、 $\tau=L/v$  ( $L$ :航空機の長さ、 $v$ :衝突速度)として算定する。

$m=140t$ 、 $v=180m/s$ 、 $L=48.5m$ として算定すると、図13の実線(ボーイング767)のようになる。

この図の中にF4ファントム(質量19t、衝突速度215m/s)の衝撃実験<sup>20)</sup>(図14参照)から得られた衝撃荷重をプロットすると、図13の点線(F4ファントム)のようになる。WTC南棟衝突のボーイング衝撃荷重の最大値はF4ファントムの衝撃荷重の最大値160MN弱の1.2倍程度であるが、継続時間については、F4ファントムの場合が0.07秒であるのに対して、ボーイング767の場合0.27秒と4倍程度長く、衝撃荷重で囲まれた面積である力積もF4ファントムに比べてボーイング767の方が6倍程度大きいと言える。

ロバートソン氏<sup>9)</sup>によると、WTCビルはボーイング707(質量152t、衝突速度81m/s、長さは筆者の仮定による45mを想定)の衝突を考慮していたとのことであるが、この条件による衝撃荷重を図13にプロットすると、破線(ボーイング707)のようになる。同時テロでのボーイング767の衝撃荷重は、ボーイング707の衝撃荷重に比べて、継続時間は衝突速度が速いので半分程度になっているが、最大値は約4.3倍、力積については、ボーイング767はボーイング707の2倍であり、かなり大きな衝撃荷重となる。

なお、これらの衝撃荷重が構造物に及ぼす影響については、弾性系の場合には図11で、弾塑性系については図12の図から評価することができる。WTCビルの弾性時の固有周期は不明であるが、高さが400mであるとすると、簡易な固有周期の評価式( $T=0.03H$ ,  $T$ :

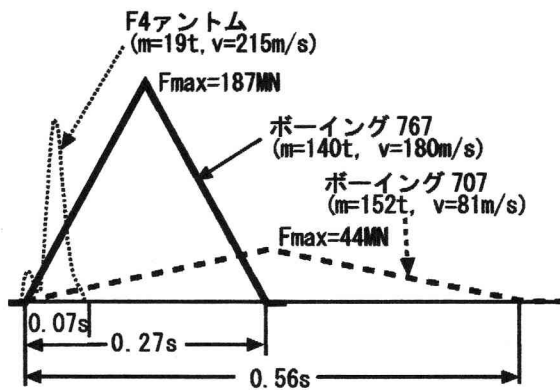


図13 航空機衝突による衝撃荷重

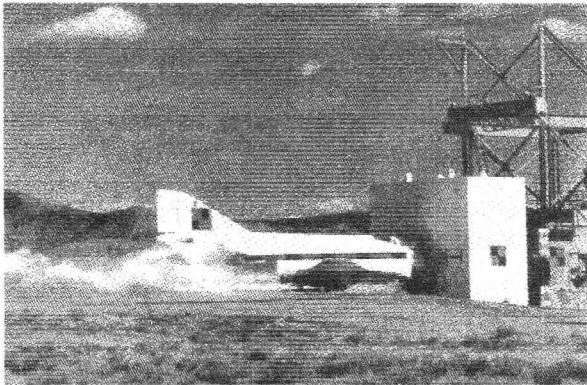


図14 F4ファントムの衝突実験<sup>20)</sup>

1次固有周期 $s$ 、 $H$ :高さ $m$ )によると、 $T=12$ 秒であるので、ボーイング767の場合、図13の $\tau/T$ は $0.27/12=1/44$ ないしそれ以下であり、仮に建物が航空機を受け止め図13に示した衝撃荷重が作用しても $R_u/F_u$ が $0.2$ 以上あればほぼ弾性限界変位に収まる程度である。なお、図12は正弦波形の場合であるが、文献<sup>18)</sup>には三角波形の場合も示されており、 $\tau/T$ が小さい領域では正弦波形の場合とほとんど差がなく、また図11の「力積破壊の世界」の領域にあるので、三角波形の場合でも結果の評価は同じである。

いずれにしても建物崩壊の原因として、衝撃力そのものの影響は比較的少なく、高温による材料強度の低下とWTCビルの構造特性の影響が大きかった<sup>3)</sup>と考えられる。そのことは100mほど離れた47階建てのソロモンプラザビルが直接航空機衝突されていないのに、下層階が延焼していたことによって崩壊したと考えられることからもうかがい知れる。

## 8. おわりに

建物への衝撃荷重の影響を把握する上で有用な既往の資料を紹介するとともに、WTCビルへの航空機衝突時の衝撃荷重を評価した。

### [ 参考文献 ]

1) 河西良幸「衝撃荷重を想定した実験」コンクリート工学」、Vol. 39, No. 9, pp. 74～77, 2001年9月

2) 河西良幸「建物への航空機衝突による衝撃荷重」、前橋工科大学研究紀要、pp. 101～106、2002年3月

3) “ニューヨーク世界貿易センターにテロ攻撃 超高層崩壊”、日経アーキテクチャ、pp. 48～53、10-1 2001年

4) “世界貿易センターの構造設計者が語る 超高層崩壊の真実”、日経アーキテクチャ、pp. 74～81、11-26、2001年

5) 外山智士、“民間航空機データベース”  
<http://www2.justnet.ne.jp/~satoshitoyama/cadb/cadb.htm>

6) Lockheed, “Large military aircraft statistics and analysis”, 1971

7) 日本建築学会ホームページ  
<http://www.aij.or.jp/aijhomej.htm>

8) T.Sugano, H.Tsubota, Y.Kasai, N.Koshika, H.Ohnuma, W.A.von Riesenmann, D.C.Bickel, M.B.Parks, “Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 1 Test program, method and results, Part 2 Evaluation of test results”, Nuclear Engineering and Design 140, pp.387-423, 1993

9) Y.Sawamoto, H.Tsubota, Y.Kasai, N.Koshika, H.Morikawa, “Analytical studies on local damages to reinforced concrete structures under impact loading by discrete element method”, Nuclear Engineering and Design 179, pp.157-177, 1998

10) P.Barr, “Guideline for the Design and Assessment of Concrete Structures Subjected to Impact”, 1990 Edition, SRD R 439 Issue 3, AEA Technology, May 1990

11) H. Morikawa, J. Mizuno, T. Momma, R.Fukuda, M. Takeuchi, Y.Shikama: Scale Model Tests of Multiple Barriers against Aircraft Impact: Part2. Simulation Analyses of Scale Model Impact Tests, Transactions of 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15), Division J, pp.145-152, August 1999

12) 千葉矩正、志田茂、大手敏、吉沢弘泰、「飛来物に対する鋼板の耐衝撃性(第1報、鋼板の破損限界の板圧依存性)」、日本機械学会論文集(A編)、47巻422号、pp. 1101-1107、1981年10月

13) 大手敏、吉沢弘泰、千葉矩正、志田茂、「飛来物に対する鋼板の耐衝撃性(第2報、鋼板の破損限界エネルギー評価法)」、日本機械学会論文集(A編)、47巻424号、pp. 1373-1378、1981年12月

14) 森川博司、河西良幸、坪田張二、内田孝、大野友則、小暮幹太、「飛来物の高速衝突を受ける鋼製ライナー付き鉄筋コンクリート板の耐衝撃性に関する実験と解析」、日本建築学会構造系論文集、第477号、pp. 107-114、1995年11月

15) 梅村魁、松島豊、「衝撃に対する一質点の線形応答」日本建築学会論文報告集、第103号、1964

16) 武藤清、「耐震設計シリーズ4 建造物の動的解析」丸善株式会社、pp. 288～291

17) 武藤清、「力積破壊の世界」日本建築学会論文集、第21号、1941

18) G.Meder, Dynamic Response of a SDOF Elastic-Plastic System Subjected to Aircraft Pulses, Nuclear Engineering and Design 74-1, 1983

19) ASCE, Civil Engineering and Nuclear Power Vol.V, “Report of the ASCE Committee on Impact and Impulsive Loads, 1980

20) T.Sugano, H.Tsubota, Y.Kasai, N.Koshika, S.Orui, W.A.von Riesenmann, D.C.Bickel, M.B. Parks, “Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force”, Nuclear Engineering and Design 140, pp.373-385, 1993