

機体衝突を受ける鉄筋コンクリート板の耐衝撃評価法とケース・スタディ

AN IMPACT RESISTANT EVALUATION METHOD OF REINFORCED CONCRETE SLABS
SUBJECTED TO THE AIRCRAFT CRASH AND CASE STUDIES

江守 克彦

Katsuhiko EMORI

Ph. D 前橋工科大学教授 工学部建築学科 (〒371-0816 前橋市上佐鳥町 460-1)

キーワード: 鉄筋コンクリート板、機体衝突、柔性及び流動体、曲げ破壊、貫通破壊、RC 板厚
(Reinforced Concrete, Aircraft Impact, Soft and Fluid Bodies, Flexural Failure, Perforation, Slab Thickness)

1 はじめに

航空機がエンジン・トラブルにより墜落し、構造物の外壁や屋根の鉄筋コンクリート (RC) 板へ衝突する現象を、その機体とエンジンを、小さなワト・パイプを内に持つ薄肉円筒シール衝突に近似して求めた RC 板の耐衝撃評価法を提案¹⁾したが、本論では、本評価法の紹介と、衝突機体の総質量として、16、19、22ton (総重量 16, 19, 22tonf、または、156. 8、186. 2、215. 6KN、以下同じ) の3ケースのケース・スタディ結果を報告する。

2 RC 板の耐衝撃評価

飛来物の衝突が被衝突物に及ぼす影響を評価する場合、飛来物と被衝突物それぞれの剛性の相対関係とその特性によって、次の3つのケースに分類して検討している。

・飛来物の衝突エネルギーを吸収する主体が非衝突物：剛飛来物、
・飛来物がエネルギー吸収の一部を負担：柔飛来物、
・エネルギー吸収主体が飛来物：流動性飛来物

ここでは、第2、第3のケースについて、小さなエンジン (柔性体) を内包する機体 (流動体) が、衝突速度 v m/sec で、RC 板の中央に直角に衝突する場合を想定した耐衝撃評価法について論ずる。この場合の衝突現象は、大きな流動体は RC 板衝突面で破壊し、周囲に四散するが、小さな柔性体は、RC 板衝突面で座屈して RC 板に局部的に貫入、または貫通する現象を想定している。本評価法では、ワト・パイプを含む薄肉円筒シール (機体) の衝突を一つの流動体衝突現象として、衝撃荷重評価、RC 板の全体曲げ破壊防止板厚評価、貫通防止板厚評価を行う。ま

た、小さなワト・パイプ (エンジン) 衝突を柔性体衝突とした局部貫通防止板厚評価を行い、最後に、その総合の耐衝撃評価を行う。その評価法を図-1に示す。

3 衝撃荷重評価式

運動量の式により、飛来物質量 m 、衝突速度 v の衝撃荷重 $F(t)$ は次式により求められる。

$$F(t) = d(m \cdot v)/dt = m \cdot dv/dt + v \cdot dm/dt \\ = m \cdot dv/dt + v \cdot (dm/dx) \cdot (dx/dt) \quad (1)$$

ここに、 $dx/dt = v$ なので、

$$F(t) = m \cdot dv/dt + v^2 \cdot (dm/dx) \quad (2)$$

文献2)によると、衝突物が非常に柔らかい物体、例えば、航空機のような場合、その衝突により生ずる衝撃荷重 $F(t)$ に占める割合として、(2) 式の第一項 ($m \cdot dv/dt$) は第二項に比べて非常に小さい (10% 以下) ことを実験成果のデータから明らかにしている。本提案では、全体の衝撃荷重評価の際には、エンジンを持つ機体衝突を流動体衝突と設定することにより、衝撃荷重 $F(t)$ は第一項を無視して、(2) 式の第二項のみに近似した。 $F(t)$ の単位を、(MN) にするために、 10^{-3} を乗じて、

$$F(t) \approx v^2 \cdot (dm/dx) \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

ここに、 v は流動体の衝突速度 (m/s) : 衝突開始時点の速度で、衝突終了まで一定とする。 dm/dx は、流動体の単位長さあたりの質量 (ton/m) である。

4 機体衝突の衝撃荷重評価

質量 19ton、衝突速度 215m/s の F4D 航空機実物モデルによる衝突実験²⁾の場合について、その機体長

さ 17.7m 方向の質量分布 (エンジン質量込み) と、その質量分布を凸型に単純化した場合の質量分布を図-2に示す。実験で得られた衝撃荷重²⁾を、図-3に示し、本提案の(3)式から求めた衝撃荷重及びF4Dの質量分布を凸型に単純化した場合の衝撃荷重を同じ図に重ねて表わす。どちらも、ほぼ一致していることが判る。F(t)は、時間依存の複雑な形状を示すので、等価衝撃荷重 Fe(t), (MN)に変換する。Fe(t)は、衝撃荷重の力積を等価にして、衝撃時間の間を一定値として求める。衝撃荷重全力積を、 $\Sigma F(t) \cdot \Delta t$ とすると、

$$Fe(t) = \Sigma F(t) \cdot \Delta t / (0.9 \cdot T_0), \quad T_0 = L/v \quad (4)$$

ここに、t と Δt は衝突後の時々刻々の時間とその時の単位時間、T₀ は衝突直後から終了までの継続時間、Lは流動体の長さ(m)である。分母の数値0.9は、衝突直後の時間帯と終了間際の時間帯は衝撃荷重値が小さいので時間を短縮した補正係数である。

5 全体曲げ破壊防止板厚評価

ここではRC板の降伏線 (Yield Line Theory) 理論 (図-4) を準用する。両辺長(2x) x (2y)の周辺固定 RC 板中央部の等価衝撃荷重 (直径、図-5の1.5R) 載荷部 (面積等価とした正方形の一辺が2a) が単位変形1変形した場合の仮想仕事式は、動荷重 Fe(t)を同じ値を持つ静荷重 Fe, (MN)にして、

・等価衝撃静荷重 Fe の仕事量: $Fe \cdot 1$

・ブロックAの仕事量 (鉄筋比は板各面同じとする):

$$M \cdot \theta 1 = 2Mu \cdot 2y \cdot 1 / (x-a) = 4Mu \cdot y / (x-a)$$

・ブロックBの仕事量: $M \cdot \theta 2 = 4Mu \cdot x / (y-a)$

ブロックA&B各々二つあるので、I補正-釣合い式から、 $Fe \cdot 1 = 8Mu \cdot (y/(x-a) + x/(y-a))$ (5)

$$Mu = 0.9 \sigma_u \cdot at \cdot d, \quad d = 0.9D$$

ここに、 σ_u は曲げ鉄筋の引張強度(MPa)、atは単位幅1mの曲げ鉄筋の断面積(cm²)、dはRC板の有効厚(m)で、DはRC板厚(m)である。Muを(5)式に代入して単位を揃えて整理すれば、耐衝撃曲げ破壊防止のRC板厚Dは(6)式となる。

$D = \sqrt{Fe / \{0.0583 \sigma_u \cdot \alpha \cdot (y/(x-a) + x/(y-a))\}}$ (6)
RC板周辺単純支持の場合、0.0583の値を1/2にして算定する。 $\alpha = at / (100 \cdot d)$ は引張り側の鉄筋比(%)であるが、本案ではRC板の各面の配筋を同じ鉄筋比とした。

6 機体衝突による貫通防止板厚評価

機体衝突によるRC板の貫通防止板厚評価は、等

価衝撃静荷重 Fe が有効衝突面積に作用すると考えて、そのパンチング・シ破壊を防ぐ板厚を設定する方法である。本評価では、衝突物が流動体で、RC板を突き抜ける前に破損し衝突物が四散する場合、いわゆるRC板を突き抜ける以前に、衝突I補正-の大部分が消耗する場合を想定している。パンチング・シ応力度算定の有効直径Tを、剛体、柔性体はR+dとし、流動体の場合は、1.5R+dとした。そのTのとり方の相関関係を図-5に示す。流動体のパンチング・シ応力度 τ , (MPa)は、

$$\tau = Fe / \{ \pi (1.5R + d) \cdot d \} \quad (7)$$

ここに、Rは剛体、柔性体、流動体のそれぞれの直径(m)で、1.5Rは流動体の有効衝突面積の直径である。これは、文献2)の実験結果から、衝突物がF4D実物モデルの場合、衝突面積10m²が衝突物断面積4.6m²の約2倍になることを示しており、直径比換算で約 $\sqrt{2}$ 倍として、1.5の値を採用したからである。

また、既往のRC板のパンチング・シの実験式は、コンクリート圧縮強度Fc、鉄筋比、強度、板厚、荷重載荷状態、せん断パン比など数多くの影響因子としてのパラメータを含んだ複雑な耐力式が提案されている。³⁾ここでは、鉄筋比 $\gamma = 0.4 \sim 1.0\%$ の範囲内の実験データ^{3,4,5)}を基に、もっとも大きな影響因子と想定され、利便性もあるコンクリートの圧縮強度(応力度)Fcの平方根、 \sqrt{Fc} (引張り応力度に相当)のみをパラメータとした実用的なRC板厚算定用のパンチング・シ応力度の目安値Tpa, (MPa)を決めた。また、これらデータには、静的、中速動的、高速動的データが混在しているので、データ比較基準を一致させるため、Fcは静的圧縮強度とした。以上から、RC板のパンチング・シ応力度の板厚算定用の目安値(許容値とは異なる概念)として(8)式を設定した。

$$Tpa \cong 0.35 \sqrt{Fc} \quad (8)$$

また、突き抜ける衝突物が剛の場合とエンジン・シリングのような柔性体の場合の実験値の比較は文献6)にあり、RC板の貫通防止板厚は、剛に比べて柔の場合は、衝突速度、100~215m/sの範囲内で、0.60~0.75倍に低減した板厚で良いと述べている。本論での流動体の場合はさらに低減できると考えられるが、安全側として、低減係数を0.75とした。このような状況を考慮して、RC板厚を算定するための剛体によるパンチング・シ応力度の板厚算定用の目安値Tpaを流動体のパンチング・シ応力度の板厚算定用の目安値 τ_a , (MPa)に変換して、下記の式を採用した。

$$\tau_a = \Phi / \beta \cdot (\sqrt{Fc}) \cong 0.45 \sqrt{Fc} \quad (9)$$

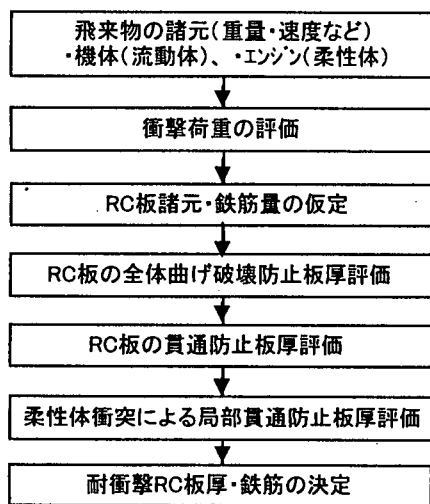
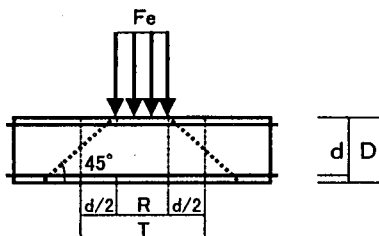
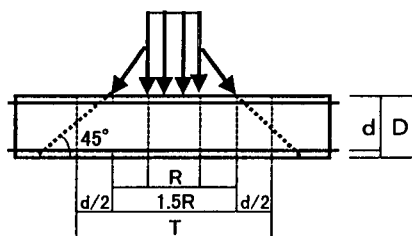


図-1 機体衝突に対する耐衝撃評価法

1) 剛 & 柔性体 飛来物



2) 流動体 飛来物



- D: RC板厚
- d: RC板有効厚
- R: 衝突体の等価直径
- T: パンチング・シア算定の有効直径

図-5 パンチング・シア算定位置のモデル化

表-1 ケース・スタディの基本条件

検討対象	項目	単位	飛来物		
			A型	B型	C型
流動体諸元	総質量	ton	16	19	22
	全長	m	15	15	15
	質量分布(段形)	ton/m	図-6	図-6	図-6
柔性体諸元	等価直径	m	2.8	2.42	2.42
	重量	tonf (KN)	1.4 (13.7)	1.7 (16.7)	1.85 (18.1)
	全長	m	5	5	5
飛来物条件	等価直径	m	1	0.8	1
	衝突速度	m/s	100~250		
	衝突角度	度	90° (直角)		
RC板諸元	寸法	m	8 x 10		
	コンクリート圧縮強度	MPa	29.4		
	鉄筋引張強度	MPa	392		
	鉄筋比(両側共)	%	0.6		

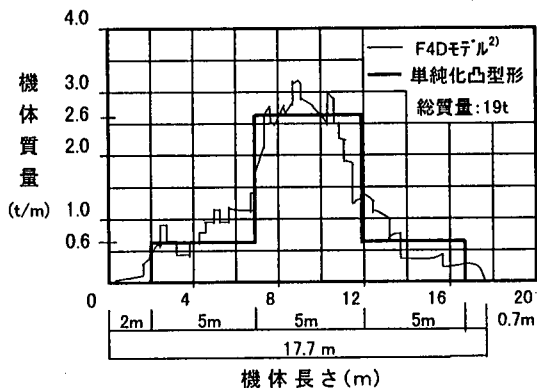


図-2 F4D実物モデルと単純化凸型の質量分布

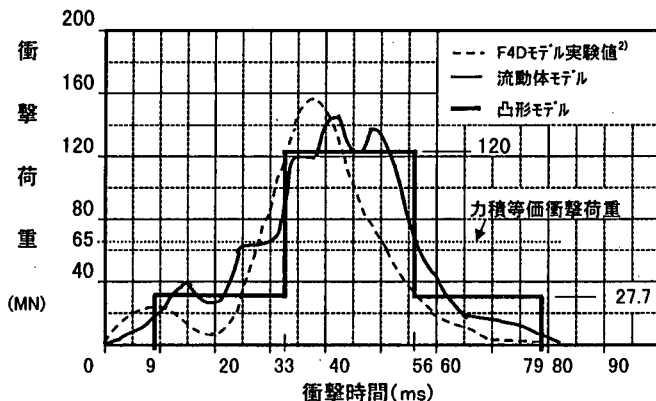


図-3 F4Dモデルによる衝撃荷重(実験値と提案値)と等価衝撃荷重

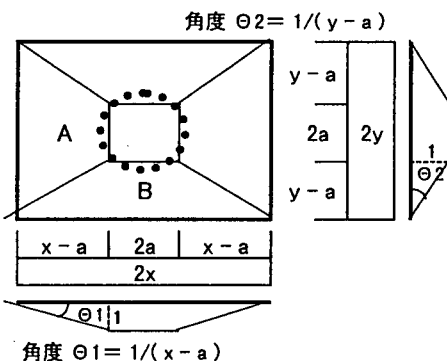


図-4 RC板の降伏線理論

	A型	B型	C型
1) 薄肉円筒シエル (直径 2.8m)	2.8Φ	2.42Φ	2.42Φ
	ソフト・パイプ (直径 1m)	0.8	1.0
2) 質量分布 (総質量16ton)	2.0 t/m	2.6	2.8
	0.6 t/m	0.6	0.8
	5m 5m 5m		
	15m		

図-6 薄肉円筒シエル(各機体)とその質量分布

ここに、 Φ は剛体による押抜きパンチング・シア耐力時の応力度の目安係数で 0.35、 β は流動体による低減係数で 0.75 である。(9)式のコンクリートの圧縮強度 F_c には、材料強度の動的増加率は考慮していない。これは、本案で対象としている衝突速度 100~250m/s の場合、そのひずみ速度は、 $0\sim 10^{-2}$ m/s の範囲で、せん断耐力の動的増加率は 1.0~1.1 とあまり増大しないからである。耐衝撃パンチング・シア耐力を持つ(貫通防止) RC 板厚は、図-5を参照して、

$$F_e / [\pi (1.5R + 0.9D) \cdot 0.9D] = 0.45 \sqrt{F_c} \quad (10)$$

(10)式を整理し、RC 板厚 D の 2 次方程式を得る。

$$(1.14 \sqrt{F_c}) \cdot D^2 + (1.91R \cdot \sqrt{F_c}) \cdot D - F_e = 0 \quad (11)$$

(11)式を解くことにより、貫通防止 RC 板厚 D が求まる。単位は D (m)、 F_c (MPa)、 F_e (MN)である。

7 エンジン衝突による局部貫通防止板厚評価

質量や大きさはひじょうに小さいが、機体(流動体)よりも少し大きい剛性を持つエンジン(柔性体)も同時に衝突する。その時の RC 板の局部貫通防止評価は、剛体衝突による RC 板の局部貫通防止板厚算定の Degen 式⁷⁾に柔性低減係数 0.75 を乗じた(12)式を適用する。^{1,6)} RC 板の局部貫通限界板厚を D_g とすると、 e/d を、付録 A1 の Degen 式で求めて、

$$D_g = 0.75 \cdot (e/d) \cdot R \quad (12)$$

8 耐衝撃 RC 板厚評価

本案では、機体(流動体)の RC 板の全体曲げ破壊防止板厚と貫通防止板厚、及び、エンジン(柔性体)による局部貫通防止板厚のうち、もっとも大きい値を耐衝撃 RC 板厚と設定した。また、初期条件の RC 板の両面の各鉄筋量 0.4~1.0%の配筋と共に総合的に耐衝撃 RC 板厚として評価する。

9 ケース・スタディ

9.1 基本条件

ケース・スタディとして、機体質量を A 型(F16)、B 型(F4D)、C 型(FX)を概略想定して、16、19、22ton の 3 ケースとし、質量分布は凸型分布を想定、衝突速度を 100、150、200、250m/s の 4 ケースについて、衝撃荷重評価を行った。エンジンの想定モデルは A 型(F100-PW-100)、B 型(J79-GE-17)、C 型(F100-PW-229 相当)である。また、大きさ 8m x 10m、上下各方向の鉄筋比 0.6%の RC 板について耐衝撃板厚を計算した。飛来物諸元、飛来物条件、RC 板の諸元など、ケース・スタディの基本条件を表-1 と図-6 に示す。

9.2 解析結果

(1) 衝突速度と衝撃荷重及び等価衝撃荷重

飛来物が上記 4 ケースの衝突速度で、それぞれが RC 板中央部に衝突した場合について、薄肉円筒シェル衝突を、流動体衝突とした(3)式で求めた各時刻歴の衝撃荷重形を図-7 に示す。また、各衝突速度と力積等価による(4)式で求めた各等価衝撃荷重を図-8 に示す。各飛来物の等価衝撃荷重曲線を 1 つのグラフにまとめて、図-10 に示す。等価衝撃荷重曲線は、衝突速度が増加するにつれて、ゆるやかな二次曲線を描いて増加する。

(2) 衝突速度と必要板厚

各型の飛来物(機体)に対して、x 軸に衝突速度を、y 軸に、全体曲げ破壊防止と、貫通防止の RC 板厚、及び局部貫通防止の RC 板厚をとったグラフを図-9 に、その必要板厚の数値一覧表を表-2 に示す。鉄筋比、各面が 0.6%の場合、流動体衝突に対する貫通防止板厚は、衝突速度が大きくなるに従って、二次曲線状に増加し、大きな衝突速度域では、RC 板厚決定の主要因となる。小さな衝突速度域では RC スラブ(周辺単純支持)の曲げ破壊防止板厚が RC 板厚決定の主要因となる。ソフ・パイプ(エンジン)による局部貫通防止板厚は、衝突速度 100~250m/s の範囲では、RC 板厚決定の要因とはならない。参考として UKAEA 式^{A2)}で求めた値を図-8、9 に示す。よく一致しているが、各曲線の上限に位置する。次に飛来物の質量分布が凸型の場合、図-11 を用いれば、機種や衝突速度などに関係なく、等価衝撃荷重のみで RC 板の耐衝撃板厚を求めることができる。

10 まとめ

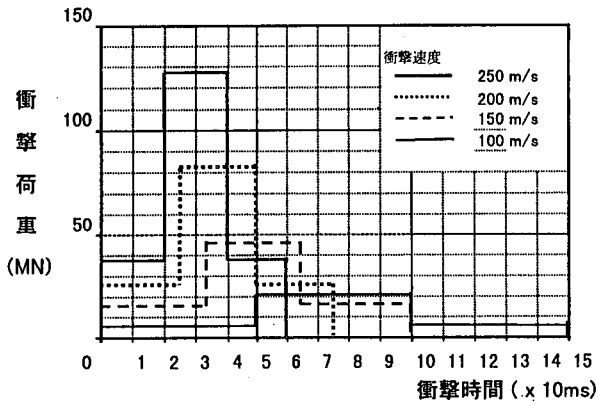
機体衝突を流動体衝突に、内包のエンジン衝突を柔性体衝突に近似した RC 板への衝突について、コンピュータによる詳細解析をしないで手計算でもできる貫通防止評価を主眼とした RC 板の耐衝撃評価法を提案した。この評価法により、概略の衝撃荷重と、耐衝撃 RC 板の厚さ、配筋の妥当性が判定でき、次段階の詳細な解析につながる第一歩となるデータを集めることができる。

謝辞：本論文をまとめる際、河西博士(鹿島)には多くの助言をいただきました。ここに感謝いたします。

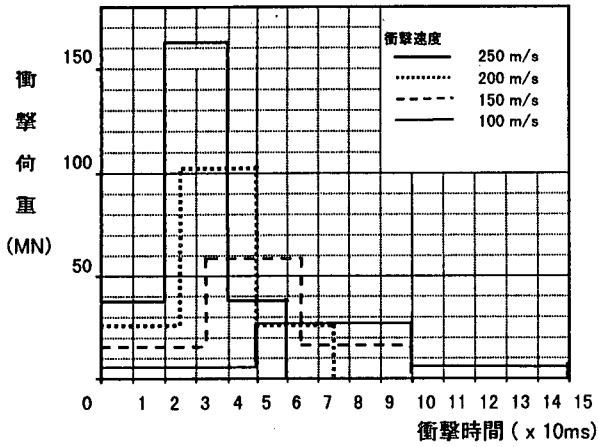
付 録

A1: Degen 式⁷⁾

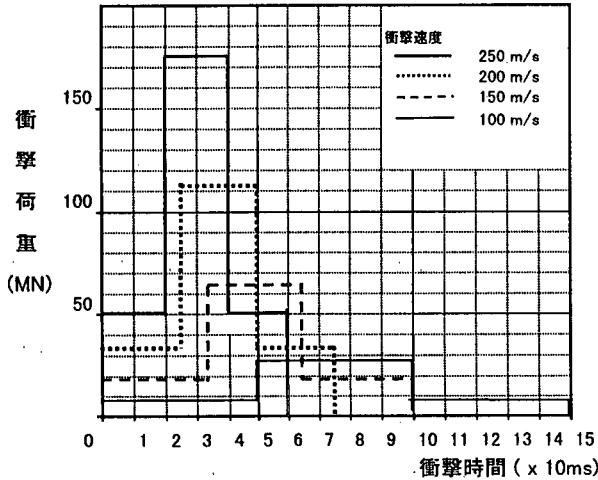
$$1) \ x/d \leq 1.52, \quad (e/d) = 2.2 \cdot (x/d) - 0.3 \cdot (x/d)^2$$



(a) A型飛来物: 総質量16 ton

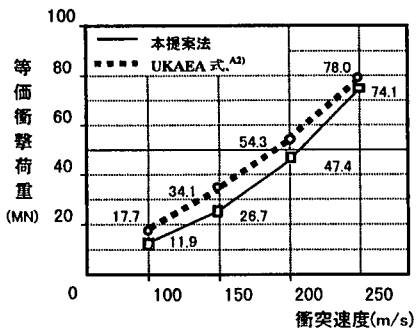


(b) B型飛来物: 総質量19 ton

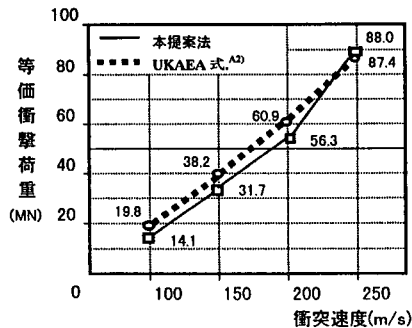


(c) C型飛来物: 総質量22 ton

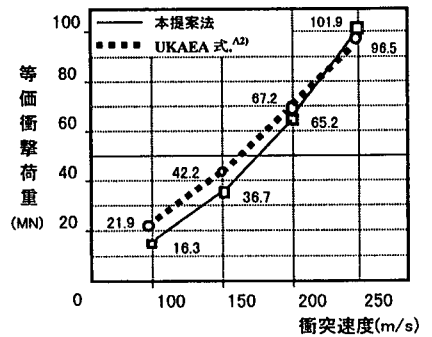
図-7 衝突速度別の衝撃荷重形



(a) A型飛来物: 総質量16 ton

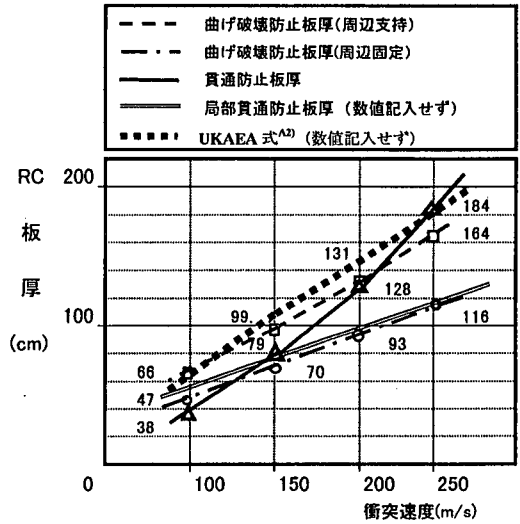


(b) B型飛来物: 総質量19 ton

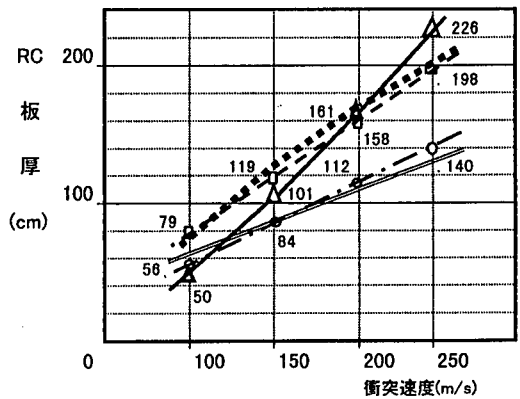


(c) C型飛来物: 総質量22 ton

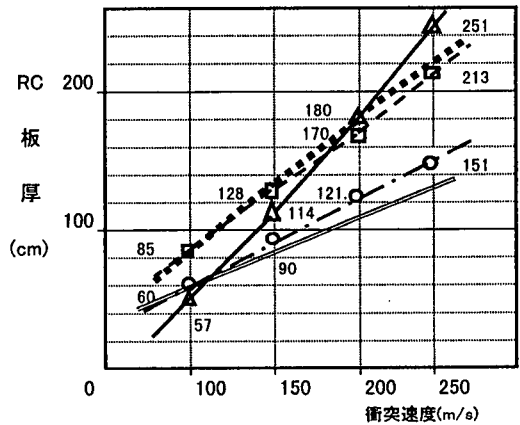
図-8 衝突速度と等価衝撃荷重



(a) A型飛来物: 総質量16 ton



(b) B型飛来物: 総質量19 ton



(c) C型飛来物: 総質量22 ton

図-9 衝突速度とRC板厚

2) $1.52 \leq x/d \leq 13.42$, $(e/d) = 0.69 + 1.29 \cdot (x/d)$
 ここに、 d は飛来物直径 (in), x は貫入深さ (in), e は貫通限界厚(in), また、 x は次式の修正 NDR 式で求める。

3) $0 \leq x/d \leq 2.0$
 $(x/d) = 2 \cdot \{ (180/\sqrt{fc'}) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1000)^{1.8} \}^{0.5}$
 4) $2.0 \leq x/d$
 $(x/d) = (180/\sqrt{fc'}) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1000)^{1.8} + 1.0$

ここに、 V は飛来物衝突速(ft/s), W は飛来物重量(lbf), D は飛来物密度(lbf/in³), N は飛来物形状係数(先端平坦): 0.72, fc' はコンクリート圧縮強度(lbf/in²)である。

A2: UKAEA 式⁹⁾
 柔性飛来物の平均衝撃力 F_{av} (N) : $F_{av} = 15.5 \cdot M^{2/3} \cdot V^{1.62}$
 貫通防止耐力 F_p (N) :
 $F_p = 8170 \cdot (R \cdot f_{cu})^{1/3} \cdot \pi \cdot T \cdot (D + 2.5T)$
 M は機体質量 (Kg), V は衝突速度 (m/s), R は鉄筋比(%), f_{cu} はコンクリートの圧縮強度 (Pa), T は有効 RC 板厚 (m), D は機体衝突直径 (m)

引用・参考文献

- 1) 江守克彦 : 柔性体・流動体衝突による RC 板の耐衝撃評価法、日本建築学会技術報告集 9 号、pp. 79-87, 1999. 12
- 2) T.Sugano, H.Tsubota, Y.Kasai, N.Koshika, S.Orui, W.A. von Rieseemann, D.C.Bickel and M.B.Parks : Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force, Nuclear Engi. and Design 140, pp.373-385,1993
- 3) 角田与史雄、井藤昭夫、藤田嘉夫 : 鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第 229 号、pp. 105-115, 1974
- 4) H. Saito, A. Imamura, M. Takeuchi, S.Okamoto, Y. Kasai, H.Tsubota and M.Yoshimura : Loading Capacities and Failure Modes of Various Reinforced Concrete Slabs Subjected to High-Speed Loading, 12thSMiRT, H9/5, 1993
- 5) 河西良幸、坪田張二、森川博司、小鹿紀英、大野友則、内田孝 : RC 板に設置した鋼製リッパ-の耐衝撃性向上効果に関する高速載荷実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 723-724, 1994
- 6) T.Sugano, H.Tsubota, Y.Kasai, N.Koshika, C.Itoh, K.Shirai, W.A. von Rieseemann, D.C.Bickel and M.B.Parks : Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles, Part 2. Evaluation of test results,

Nuclear Engi. and Design 140, pp.407-423,1993

- 7) P.P.Degen: Perforation of Reinforced Concrete Slabs by Rigid Missiles, J. Struct. Div. ASCE, Vol.106, No.ST7, 1980
- 8) P. Barr: Guidelines for the Design and Assessment of Concrete Structures subjected to Impact, SRD R439, 1990

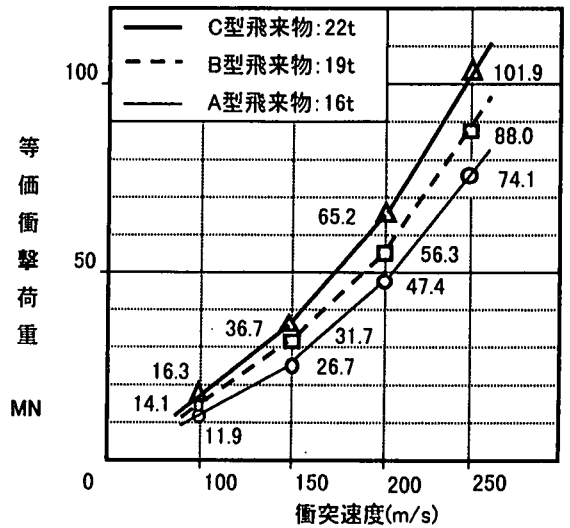


図-10 衝突速度と等価衝撃荷重曲線

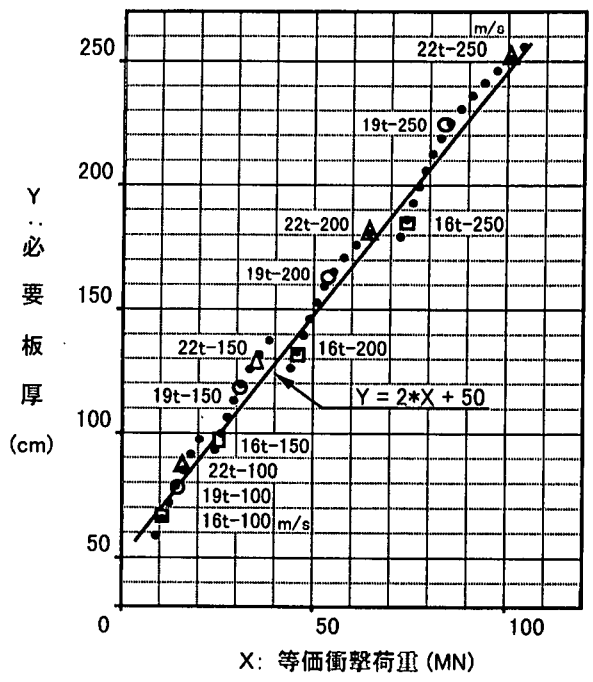


図-11 等価衝撃荷重と必要板厚

表-2 各飛来物(機体)の各衝突速度における耐衝撃RC板厚(cm)

RC板の破壊防止板厚	A型(16ton)				B型(19ton)				C型(22ton)			
	衝突速度 (m/s)				衝突速度 (m/s)				衝突速度 (m/s)			
	100	150	200	250	100	150	200	250	100	150	200	250
曲げ破壊防止板厚(周辺支持)	66	99	131	164	79	119	158	198	85	128	170	213
曲げ破壊防止板厚(周辺固定)	47	70	93	116	56	84	112	140	60	90	121	151
貫通防止板厚	38	79	128	184	50	101	161	228	57	114	180	251
局部貫通防止板厚	55	77	97	117	62	86	108	128	60	85	107	128
参考: UKAEA 式(貫通防止板厚)	63	104	144	183	77	122	164	205	83	130	175	218