

(34) RC への柔飛来物の衝突による貫通、裏面剥離に関する 3つの既往実験への UKAEA ガイドの評価法の適用性検討

Examination on applicability of the UKAEA method for perforation and scabbing thickness due to soft missile impact to RC by three impact tests

桂 正治*, 河西 良幸**, 坪田 張二***
Masaharu Katsura, Yoshiyuki Kasai, Haruji Tsubota

* 前橋工科大学工学研究科, 大学院生 (〒371-0816 前橋市上佐鳥町 460-1)

** 工博, 前橋工科大学大学院教授, 工学研究科 (〒371-0816 前橋市上佐鳥町 460-1)

*** 工博, 前橋工科大学大学院教授, 工学研究科 (〒371-0816 前橋市上佐鳥町 460-1)

キーワード: 柔飛来物の衝突, 貫通, 裏面剥離, 評価式
(Soft missile impact, perforation scabbing, evaluation formula)

1. はじめに

一般に、航空機の衝突のような衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物に発生する損傷は、図-1¹⁾に示すように、全体損傷と局部損傷とに大別される。

全体損傷は、比較的長い継続時間を有する現象であり、動的な弾塑性応答として特徴づけられ、従来の非線形の有限要素法により、時間応答の動的解析を行うことで、損傷を評価することができる。

また、飛来物の衝突に起因する局部損傷は、貫入、裏面剥離、貫通に分類される。

コンクリート構造物の局部損傷に関して、これまでに多くの評価式が提案されているが、そのほとんどが剛な飛来物(hard missile)を用いた実験の結果に基づく実験式として提案されている。したがって、これらの評価式の適用性は、剛飛来物の場合に限られている。

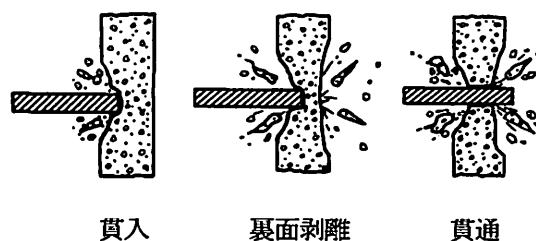
航空機は、機体部分とエンジン部分とで構成され、航空機の衝突について考えた場合、機体部分だけでなくエンジン部分についても、柔な飛来物(soft missile)であると考えることができる。

柔飛来物によって誘発される局部損傷を評価するため、これまでにいくつかの方法が提案されている。²⁾ その中で、英国の UKAEA(UK Atomic Energy Authority)が中心となり作成されたガイドライン”Guidelines for the Design and Assessment of Concrete Structures Subjected to Impact: SRD R439 Issue 3 by P. Barr, 1990”³⁾ (以下、UKAEA ガイドと称する。)は、航空機のような柔飛来物の衝突によるコンクリート構造物の局部損傷を容易に評価することができる。ただし、UKAEA ガイドにおける評価方法は、1990年以前の実験的及び解析的研究^{4) 5)}

に基づいている。

本論文では、まず、柔飛来物の衝突による局所損傷に関する UKAEA ガイドの評価方法について記述する⁶⁾。そして、UKAEA ガイドの評価方法の適用性と精度を検証するために、著者らによって行われた航空機機体の縮尺モデル衝突実験^{7)・8)}、航空機エンジンの縮尺モデル衝突実験^{9)・10)・11)}、実大航空機エンジン衝突実験^{9)・10)・11)}の3つの実験を適用例として、実験結果と UKAEA ガイドの評価方法による予測値との比較を行った。

局部損傷



全体損傷

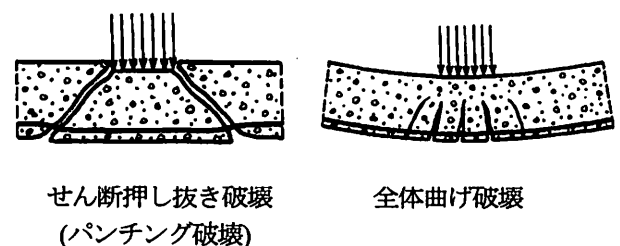


図-1 局部損傷と全体損傷¹⁾

2. 柔飛来物の衝突による貫通、裏面剥離に関する UKAEA ガイドの評価方法の概要

UKAEA ガイドでは、柔飛来物の衝突によるコンクリート構造物の貫通、裏面剥離は、以下のように評価することができる。

軟らかい衝突物体の衝突は、コンクリート構造物に対して、相当の曲げを生じさせるのに十分な荷重継続時間を有しており、衝突対象物（スラブ）の破損は一般にたわみによる引張りひび割れから始まり、最終的にせん断破壊に至る。貫通の予測に関しては、単純化された方法が開発され、この方法は、衝突物体による平均動的荷重 (F_{av}) がスラブの動的パンチング強度 (F_p) に達した時、貫通を予測するというものである。

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

F_p 鉄筋コンクリートスラブに対する軟らかい衝突物体の貫入における動的パンチング力 [N]

R スラブの裏面に含まれる曲げ鉄筋の平均的なパーセンテージ [%]

$$R = \frac{100}{2T} \left(\frac{n_l a_l}{l} + \frac{n_w a_w}{w} \right)$$

f_{cu} 一辺 150mm の立方体で測ったコンクリートの基準圧縮強度 [Pa]

n_l 1 間の鉄筋の本数

n_w w 間の鉄筋の本数

a_l 1 間の各々の鉄筋の断面積 [m^2]

a_w w 間の各々の鉄筋の断面積 [m^2]

D 航空機荷重跡の有効直径 [m]

T 衝突対象物（スラブ）の有効厚さ [m]

裏面剥離は F_{av} がスラブの裏面剥離の動的パンチング強度 (F_s) に達した時に起きると予測される。

$$F_s = 7040(Rf_{cu})^{1/3} \pi T(D+2.5T) \quad (2)$$

F_s 鉄筋コンクリートスラブに対する軟らかい衝突物体の裏面剥離における動的パンチング力 [N]

この方法を開発するために使われた試験では、スラブがその最大変位応答に達するまでの時間 t_m と、衝突物体がその衝撃力積の最初の 90% を伝達するのに要する時間の比は、 $0.6 < t_m/T_{90} < 1.0$ の範囲内にあり、 $t_m/T_{90} \geq 1.0$ ならば、保守的な強度の推定が上記の(1)式と(2)式によって与えられる。しかし $t_m/T_{90} < 0.6$ ならば非保守的な強度の推定が予想される可能性がある。上記(1)式と(2)式は次の範囲内で信頼して使うことができる。

$$0.07 < T < 0.90$$

$$0.66 < D/T < 1.30$$

$$0.22 < R < 1.26$$

$$0.05 < A_g/T < 0.07$$

$$25 \times 10^6 < f_{cu} < 63 \times 10^6$$

A_g : 骨材の大きさ (平均直径) [m]

但し、上記範囲外では(1)式と(2)式の正確さは減少するものと考えられ、また骨材の大きさ A_g とスラブ厚さ T の比 A_g/T の値が 0.05 以下では(1)式と(2)式は非保守的になり得る。なお、上記範囲内で(1)式の正確さはほぼ $\pm 20\%$ 、(2)式の正確さはほぼ $\pm 24\%$ である。

簡略化された方法で使われる F_{av} の値は、全衝撃力積 I の最初の 90% を伝達するのに要する時間における平均の力で、次式より算定する。

$$F_{av} = 0.9I / T_{90} \quad (3)$$

F_{av} 平均動的荷重 [N]

T_{90} 軟らかい衝突物体がその衝撃力積の最初の 90% を伝達する時間 [s]

I 軟らかい衝突物体の全衝撃力積 [Ns]

破壊しながら衝突する物体によるスラブへの荷重を決定する方法は次の仮定に基づいている。

- (1) 衝突物体の破壊の期間、スラブの変形はない。
- (2) 衝突物体の瞬間的変形は衝突面近くの小さな領域に限られている。
- (3) 衝突物体の変形領域と末端の間は変形しない。(変形領域に入るまで) したがって、この非変形領域のすべての部分は同じ速度で動いている。
- (4) スラブに対する瞬間的な力は次のものの和である。
 - (a) 変形領域を圧壊させるための (動的) 荷重
 - (b) 衝突物体の圧壊していない部分の運動量の変化
衝突物体の先端からの距離 X の材料が損傷領域に入って静止させられる時、それは衝突面に対して次の瞬間的な力 $F(t)$ を与える。

$$F(t) = P_d(X, V) + U(X)V^2 \quad (4)$$

ここに $P_d(X, V)$ は位置 X 及び圧壊しつつある部分の衝突速度 V における衝突物体の動的圧壊強度であり、 $U(X)$ は、位置 X での単位長さあたりの質量、 V は衝突物体の圧壊していない部分の瞬間速度である。 $U(X)V^2$ は単位時間あたり変形領域に入ってくる運動量の消滅によって生じた力である。

衝突の間、変形領域は衝突物体の圧壊していない部分に対して $P_d(X, V)$ の力を及ぼすと仮定される。この力は圧壊していない部分の減速 $A(X, V)$ を生じて、それは $P_d(X, V)$ と圧壊していない部分の質量の比である。即ち、

$$A(X, V) = \frac{P_d(X, V)}{\int_X^L U(k) dk} \quad (5)$$

ここに $U(k)$ は、衝突物体の末端と X の間のある点での衝突物体の圧壊していない部分の単位長さあたりの質量であり、 L は衝突物体の長さである。

典型的な軍用戦闘機（軟らかい衝突物体）の正面（垂直）衝突による平均動的荷重（ F_{av} ）については、簡略化された方法で求めることができる。

$$F_{av} = 15.5M^{2/3}V_i^{1.62} \quad (6)$$

M : 航空機の質量 [kg]

V_i : 航空機の衝突速度 [m/s]

この方程式の有効範囲は、

$$70 < V_i < 300$$

$$5000 < M < 80000$$

3. 既往実験による適用性の検証

著者である坪田、河西らによって行われた3つの衝突実験(図2-4)を適用例として、RC版への柔飛来物の衝突による貫通、裏面剥離の局部損傷に関して、UKAEAガイドの評価方法によって予測される損傷と実験結果による損傷の比較を行った。

本論文では、3つの衝突実験をそれぞれ、Test A、Test B、Test C と名前を付け、それぞれの実験の主な仕様を表-1に示す。

- (i) Test A : 航空機機体の 1/7.5 縮尺模型による衝突実験
- (ii) Test B : 航空機エンジンの 1/7.5 縮尺模型による衝突実験
- (iii) Test C : 実大航空機エンジンによる衝突実験

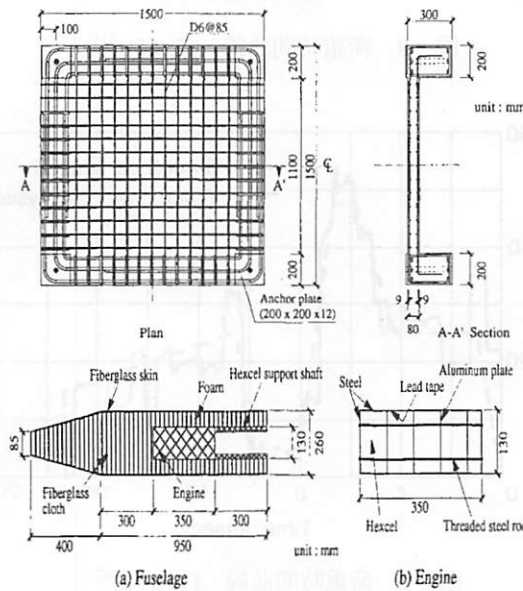


図-2 RC版と衝突物体 (Test A)⁷⁾

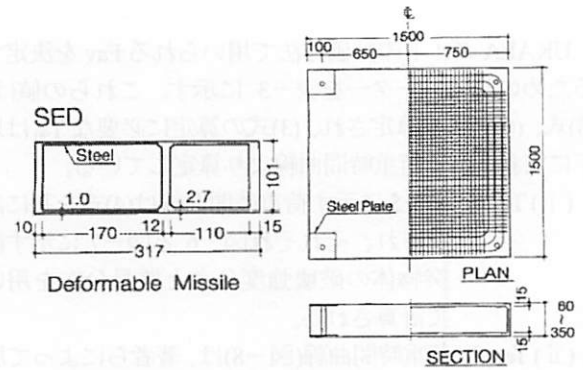


図-3 RC版と衝突物体 (Test B)⁹⁾

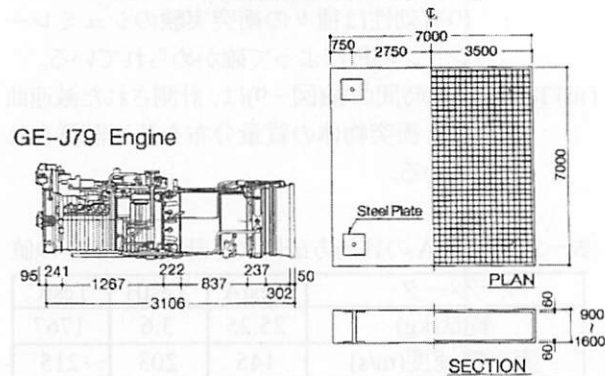


図-4 RC版と衝突物体 (Test C)⁹⁾

表-1 3つの衝突実験の主な仕様

試験	TestA	TestB	TestC
スケール	1/7.5	1/7.5	1/1
衝突物体			
タイプ	柔飛来物 縮尺模型	柔飛来物 縮尺模型	柔飛来物 実大航空機エンジン
モデル	航空機機体(エンジン含む) (図2)	航空機エンジン (図3)	航空機エンジン (GE-J79) (図4)
重量 (kg)	25.25	3.6	1500
直径 (mm)	260	101	760
長さ (mm)	1350	317	3106
衝突速度 (m/s)	150	100,150,215	215
RC版			
寸法 (m)	1.5 × 1.5	1.5 × 1.5	7.0 × 7.0
厚さ T_0 (mm)	60,80,100,160	60-350	900-1600
主筋比 (%)	0.47	0.2,0.4,0.6	0.4
せん断補強筋比 (%)	0	0.0,2.0,4	0
コンクリート圧縮強度 (MPa)	31-38	23.5	23.5
出典(実験)	Tsubota et al.,1999	Sugano, Tsubota, Kasai et al.,1993	
出典(解析)	Tsubota et al.,1999	Sawamoto, Tsubota, Kasai et al.,1998	

UKAEAガイドの評価方法は、限られた実験データに基づいており、適用性において有効範囲がある。Test A、Test B、Test Cのパラメーターは、表-2に示すように、UKAEAガイド評価方法の有効範囲外にあるため、本論文では、UKAEAガイドの評価方法の有効範囲外における適用性の検証を行うこととなる

表-2 UKAEA の評価方法と実験におけるパラメーターの比較

式	UKAEAガイドの評価方法		Test A	Test B	Test C
	パラメーター	有効範囲			
F_p (1)	T	$0.07(m) < T < 0.9(m)$	0.048,0.065,0.085,0.14	0.044-0.319	0.808-1.497
	D/T	$0.66 < D/T < 1.3$	5.42,4.00,3.06,1.78	0.32-2.30	0.48-0.84
	R	$0.22(\%ew) < R < 1.26(\%ew)$	0.47	0.2,0.4,0.6	0.4
F_s (2)	A_g/T	$0.05 < A_g/T < 0.07$	0.068-0.21	0.031-0.23	0.017-0.031
	f_{cu}	$25 \times 10^6(Pa) < f_{cu} < 63 \times 10^6(Pa)$	$37.3-45.8 \times 10^6$	28.3×10^6	28.2×10^6
	t_m/T_{90}	$0.6 < t_m/T_{90} < 1.0$	測定不能	$0.1(ms)/1.1(ms)=0.09$ $T_0=180mm$ (解析) (Sawamoto et al.,1998)	$20(ms)/14.7(ms)=1.4$ $T_0=1.6m$ (実験) (Sugano et al.,1993)
F_{av} (6)	M	$5000(kg) < M < 80000(kg)$	25.25	3.6	約1500
	V_i	$70(m/s) < V_i < 300(m/s)$	150	100,150,215	215

UKAEA ガイドの評価方法で用いられる Fav を決定するためのパラメータを表-3 に示す。これらの値は、(3)式、(6)式より算定され、(3)式の算定に必要な T_{90} は以下に定義される荷重時間曲線より算定している。

- (i) Test A: 図-5 に示す荷重時間曲線は(4)式を基に計算され、それぞれ図-6 と図-7 に示す衝突物体の破壊強度分布と質量分布を用いて計算される。
- (ii) Test B: 荷重時間曲線(図-8)は、著者らによって展開された個別要素法によって計算され、その有効性は種々の衝突実験のシミュレーション解析によって確かめられている。
- (iii) Test C: 荷重時間曲線(図-9)は、計測された減速曲線と衝突物体の質量分布を基に計算されている。

表-3 UKAEA の評価方法により計算した Fav の値

パラメーター	TestA	TestB	TestC
質量(kg)	25.25	3.6	1767
実衝突速度(m/s)	145	203	215
T_{90} (s)	0.0077	0.0011	0.0147
I(kgm/s)	3660	731	380000
$0.9I/T_{90}$ (MN) (3)	0.428	0.598	23.3
$15.5M^{2/3}V_i^{1.62}$ (MN) (6)	0.423	0.199	13.6

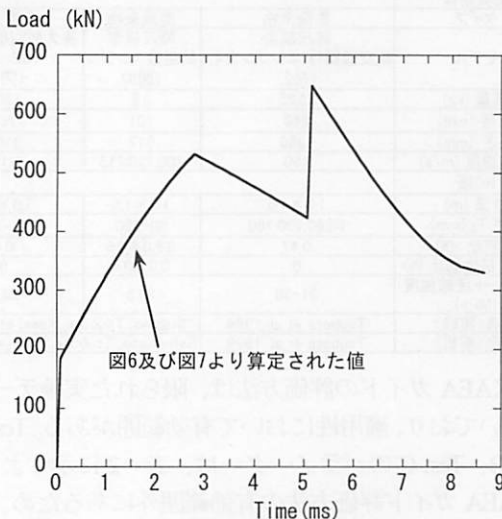


図-5 荷重時間曲線 (Test A)

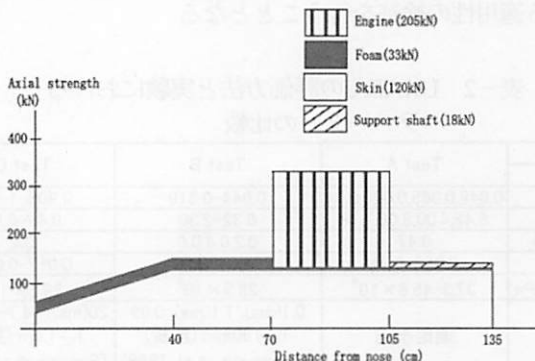


図-6 航空機機体及びエンジン部分の破壊強度分布⁷⁾

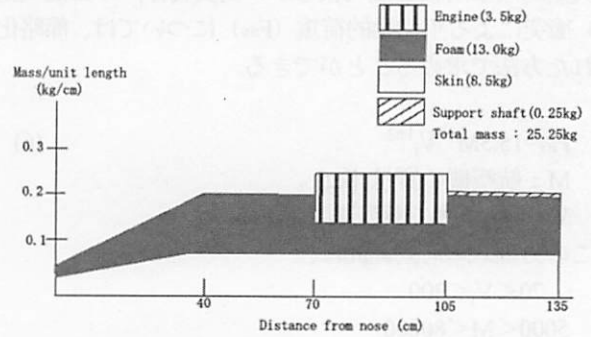


図-7 航空機機体及びエンジン部分の質量分布⁷⁾

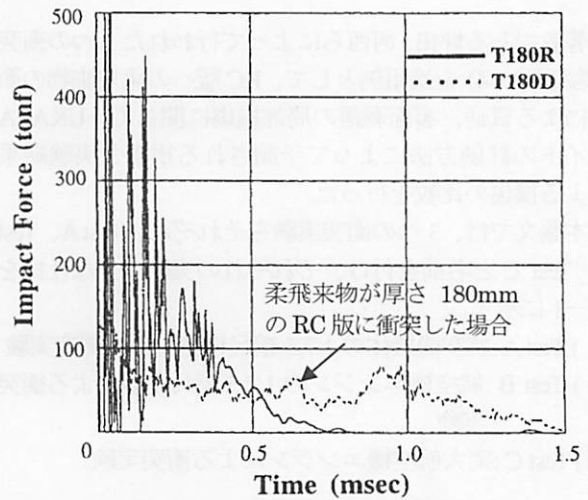


図-8 荷重時間曲線 (Test B)¹¹⁾

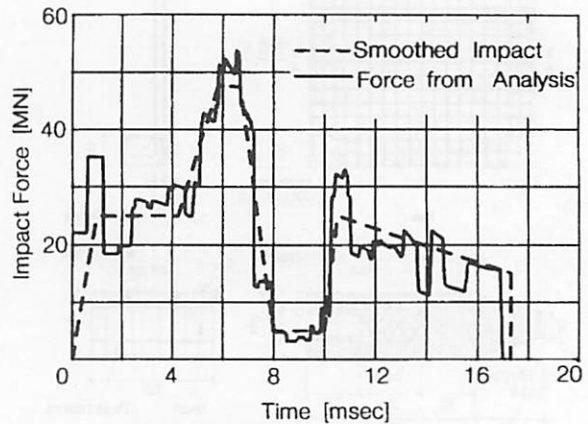


図-9 荷重時間曲線 (Test C)¹⁰⁾

表-3 に示すように、それぞれ(3)式と(6)式から算定される2つの Fav の値は、TestA の場合、比較的近い値となり、TestB 及び TestC の場合、値は大きく異なっている。TestA において、衝突物体は航空機機体であるのに対し、TestB、TestC は、航空機エンジンであり、機体よりも硬い衝突物体である。このことから、航空機機体のような柔らかい衝突物体に対しては、Fav を算定する簡略化された(6)式は精度があると言える。

図10-12にTest A, Test B, Test Cにおける(1)式、(2)式、(3)式より算定した F_p (貫通における動的パンチング耐力)、 F_s (裏面剥離における動的パンチング耐力)、 F_{av} (平均動的荷重) をそれぞれ示す。実験における衝突物体の目標衝突速度は、それぞれ Test A については150m/s, Test B は215m/s, Test C は215m/s となっているが、実験においてそれぞれ測定された衝突速度は、目標速度とわずかに異なっている。図10-12においてプロットした F_{av} は、実験において測定した衝突速度をそれぞれ用いて算定している。

UKAEAガイドの評価方法によって評価された損傷を、実験において観察された損傷と共に図10-12に示す。

UKAEAガイドの評価方法による貫通および裏面剥離限界厚さは、 F_{av} と F_p, F_s との交点によって定められる。表-4に実験結果による限界厚さとUKAEAガイドの評価方法による限界厚さを示す。実験結果における損傷から実際の限界厚さの値を決定するのは難しく、表-4では厚さの範囲として表現している。

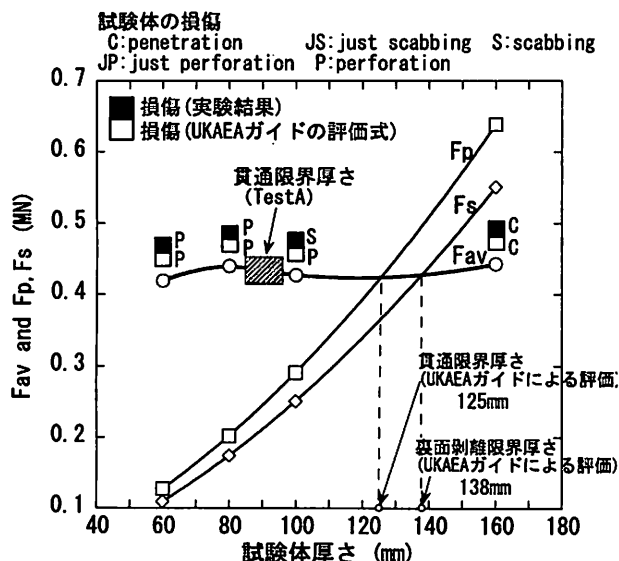


図-10 Fav と F_p, F_s (Test A)

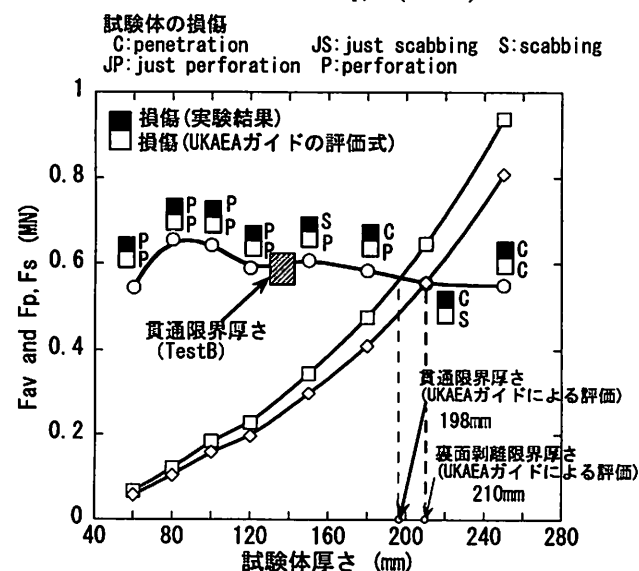


図-11 Fav と F_p, F_s (Test B)

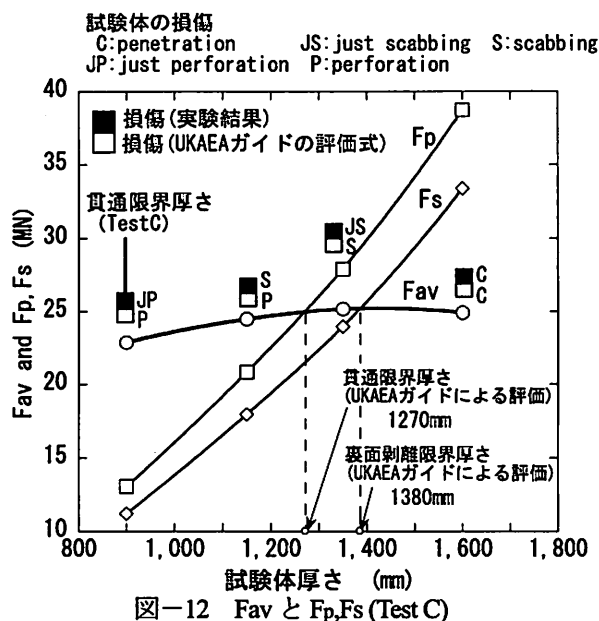


表-4 UKAEAガイドによる評価と実験結果の損傷の比較

損傷	TestA		TestB		TestC	
	貫通	裏面剥離	貫通	裏面剥離	貫通	裏面剥離
実験	80-100	約100	120-150	約150	900	1350
UKAEAガイドの評価	125	138	198	210	1270	1380

(単位: mm)

表-4 及び図10-12よりUKAEAガイドの評価方法より得られた貫通、裏面剥離限界厚さは実験結果から得られた限界厚さよりも20~40%大きい値となっている。TestCの場合、UKAEAガイドの評価方法と、実験結果より得られた裏面剥離限界厚さはよく一致している。このことから、UKAEAガイドの評価方法は、柔飛来物の衝突によるスラブの局部損傷を安全側の評価ながらも適切に評価しており、UKAEAガイドの評価方法の適用性と精度があると言える。

図-13にRCスラブの貫通に関する衝突限界速度を示す。衝突限界速度は、貫通に関しては、 $F_{av}=F_p$ となる衝突速度(V_i)の値、裏面剥離に関しては、 $F_{av}=F_s$ となる衝突速度の値を読み取ってそれぞれ得られる。

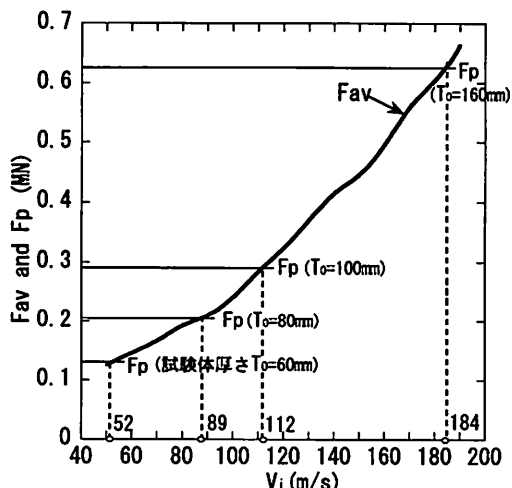


図-13 UKAEAの評価による貫通限界速度(TestA)

図-13において、RCスラブの厚さが60mmの場合、貫通における衝突限界速度は、52m/s、80mmの場合89m/s、100mmの場合112m/s、160mmの場合184m/sとなる。

実験結果の損傷を見ると、目標衝突速度150m/sにおいてRCスラブの厚さが60mm、80mmの場合貫通、100mmの場合裏面剥離、160mmの場合裏面剥離が生じていないという結果になっている。実験結果とUKAEAガイドの評価による衝突限界速度を比較すると、UKAEAガイドの評価が実験結果よりも小さい値となっており、安全側の評価であると言える。

4. まとめ

本報告では、まず柔飛来物の衝突によるスラブの貫通、裏面剥離の評価についてUKAEAガイドの評価方法の概要を述べた。そして、評価方法の適用性と正確性の検証を行うために、著者らによって行われた3つの衝突実験を適用例として、実験結果とUKAEAガイドの評価法との比較を行った。

その結果、UKAEAガイドの評価方法は、安全側ながらも適切に局部損傷を評価しており、評価方法は適用性と精度があると言える。しかし、UKAEAガイドの評価方法の有効範囲外の場合、航空機機体の衝突に関しては、適用性が確かめられたが、航空機エンジンの衝突に関しては、いくつかの修正が必要であるということが考えられる。

航空機の衝突に対するRC構造物の耐衝撃性の評価、設計¹²⁾においてUKAEAガイドの評価は適用性があると言える。

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 第39巻9号，pp.74-77，2005年
- 2) 小鹿紀英，坪田張二，河西良幸：柔飛来物の衝突によるRC版への局部損傷評価法，第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.1-4，1996年
- 3) P. Barr：Guidelines for the Design and Assessment of Concrete Structures subjected to Impact 1990 Edition，WA3 4NE，1990
- 4) J.Jowett and K.Kinsella：Soft Missile Perforation Analysis of Small and Large Scale Concrete Slab，Proceeding of the First International Conference on Structures under Shock

and Impact，pp.121-132

- 4) K.Kinsella and J.Jowett：The Dynamic Load Arising from a Crashing Military Combat Aircraft，Proceeding of the First International Conference on Structures under Shock and Impact，pp.277-288
 - 5) 桂正治，河西良幸：RCへの柔飛来物の衝突における貫通、裏面剥離限界に関するUKAEAガイドの評価の概要と既往実験による検討，前橋工科大学研究紀要 第11号，pp.35-40，2008年
 - 6) Tsubota,H., Koshika,N., Mizuno,J., Sanai,M., Brian Peterson, Saito,H., and Akira,Imamura：Scale Model Tests of Multiple Barriers against Aircraft Impact: Part1.Experimental Program and Test Results，Transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15) Seoul, Korea, pp.137-144, 1999
 - 7) Morita,H., Mizuno,J., Momma,T., Fukuda,R., Takeuchi,M., and Shikama,Y.,：Scale Model Tests of Multiple Barriers against Aircraft Impact: Part2.Simulation Analyses of Scale Model Impact Tests，Transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15) Seoul, Korea, pp.145-152, 1999
 - 8) Sugano,T., Tsubota,H., Kasai,Y., Koshika,N., Ohnuma,H., W. A.von Riesmann, D. C. Bickel and M. B. Parks：Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 1. Test program method and results，Nuclear Engineering and Design 140, pp.387-405, 1993
 - 9) Sugano,T., Tsubota,H., Kasai,Y., Koshika,N., Ohnuma,H., W. A.von Riesmann, 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 Engineering and Design 140, pp.407-423, 1993
 - 10) Sawamoto,Y., Tsubota,H., Kasai,Y., Koshika,N., Morikawa,H.,：Analytical studies on local damage to reinforced concrete structures under impact loading by discrete element method，Nuclear Engineering and Design 179, pp.157-177, 1998
 - 11) 土木学会 構造工学委員会 構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会：性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法，構造工学技術シリーズ No. 52, 2007年
- 論文受付日 2008年11月11日(金)