

(43) 鉄筋コンクリート板への柔飛来物の衝撃貫通挙動に関する個別要素法解析

ANALYTICAL STUDIES ON IMPACT PERFORATION BEHAVIOR ON REINFORCED CONCRETE PANELS
BY DISCRETE ELEMENT METHOD

瀬戸 裕*, 森川博司*, 坪田張二*, 河西良幸*, 小鹿紀英*, 水野 淳*

Yutaka SETO, Hiroshi MORIKAWA, Haruji THUBOTA, Yoshiyuki KASAI, Norihide KOSHIKA, Jun MIZUNO

*小堀鐸二研究所 (〒107-8388 東京都港区元赤坂 1-2-7)

キーワード：個別要素法, RC板, 柔飛来物, 衝撃貫通挙動

(Discrete element method, RC panel, Soft missile, Impact perforation behavior)

1. はじめに

衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の破壊挙動の評価については、特に重要構造物の防災上の観点から近年関心が高まり、この種の外力に対する設計法の確立が緊急の課題となっている。

衝撃荷重による RC 板の損傷モードは、全体破壊と局部破壊に分類される。このうち局部破壊については解析的评价が困難であったが、近年各種解析法により評価が試みられるようになってきた。筆者らは、このような衝撃荷重による RC 板の局部破壊問題の評価法として、DEM に着目し、コンクリートシリンドラーの一軸圧縮試験、割裂試験の静的、高速載荷時のシミュレーション解析により、ひずみ速度による強度の増加率 (Dynamic Increase Factor, DIF) を含めた DEM 解析パラメータの妥当性を示した。さらに強度の異なる飛来物に対する RC 板の衝撃実験シミュレーション解析により、本手法でコンクリート構造物の局部破壊性状を定量的に評価可能であることも示してきた^{1), 2), 3), 4)}。

本論文では、航空機エンジンをモデル化した柔飛来物および剛飛来物による RC 板衝撃実験のうち貫通したケースについてシミュレーション解析を行い、貫通後の飛来物の残留速度を実験結果および既往の評価式と比較する。また、剥離物の飛散速度と重量についても解析的検討を行う。

2. 解析方法

個別要素法は、解析対象物を粒子の集合体として

考え、個々の要素が運動方程式を満足しつつ、接触時の力の伝達によって全体の動力学的特性を表わす方法である。本解析では、図-1のように剛体の円形要素を用い、接触要素間に働く力は法線方向および接線方向の非線形ばねとダッシュポットで表現している。この要素間ばねの破壊基準として Mohr-Coulumb 型の破壊基準を設定している。運動方程式の解法には、陽的積分法を用い逐次計算を行っている。

3. RC 板衝撃実験のシミュレーション解析

3.1 実験の概要

この実験は、1 辺 150cm で板厚を 6~35cm に変化させた 4 点支持の RC 板に、直径 10.1cm、重量 3.6kgf の剛および柔飛来物を速度 100~215m/s で衝突させたものである⁵⁾。本論文では、速度約 200m/s で、剛飛来物により貫通した板厚 15cm (T15R) のケースと、柔飛来物により貫通した板厚 6cm (T6D)、8 cm (T8D)、12 cm (T12D) の計 4 ケースを解析対象とする。コンクリート強度、実衝突速度等の諸定数を表-1 に示す。

実験終了時の飛来物および RC 板の損傷状況を図-2 に示す。また、高速カメラのフィルムより読み取った裏面剥離物先端の速度はそれぞれ、T15R で約 50m/s、T6D で約 135m/s、T8D で約 95m/s、T12D で約 45m/s であった。貫通後の飛来物は、剥離物に包まれているため、正確な残留速度は分からないが、裏面剥離物先端の速度と同等、もしくは若干遅い速度と推測される。

3.2 解析モデル

解析は軸対称モデルにより実施した。RC板は半径45cmの円板でモデル化し、境界条件は周辺固定とした。コンクリートは半径0.39cm (T15R)、0.29cm (T6D)、0.33cm (T8D)、0.38cm (T12D)の円形要素でモデル化し、鉄筋は配筋位置に対応する円形要素間にBi-Linear型の弾塑性特性を持つ軸ばね要素としてモデル化した。また、剛および柔飛来物は図-3に示すように半径0.25cmの円形要素でモデル化し、各部の重量、軸剛性および強度が実飛来物と等しくなるように、要素重量、要素間ばねのばね定数および強度を設定した⁶⁾。解析時間刻みは 2.5×10^{-7} secとし、各ケースについて飛来物が完全に貫通するか、残留速度が一定となるまで解析を行った。解析に用いた諸定数を表-2に示す。

3.3 剛飛来物の解析結果

(1) RC板の損傷状況

図-4に代表時刻における損傷状況を示す。RC板裏面中央のかぶりコンクリート部分が先に飛散し、その後を剥離したコンクリートに包まれるように飛来物が貫通していく。RC板のクレーターの大きさは、衝突面27cm、裏面72cmであり、これらの結果は図-2の実験結果と良い対応を示している。また、鉄筋の破断時刻は、上端筋0.14ms、下端筋0.80msであった。

(2) 飛来物の残留速度

図-5に飛来物の速度時刻歴を示す。飛来物の速度は衝突直後急激に減速し、0.45ms以後は一定速度となる。

飛来物の貫通後の残留速度は約42m/sで、実験における裏面剥離物先端の速度約50m/sより若干遅い速度となっている。また、既往の残留速度評価式であるASCE式⁷⁾では59.5m/s、Kar式⁸⁾では41.2m/sであり、解析結果はKar式と良い対応を示している。なお、これらの評価式に用いる貫通限界厚さおよび貫通限界速度はCEA-EDF式⁹⁾により求めた。

(3) 剥離物の速度と重量

表-3は、剥離物の飛散速度と重量の関係を示している。剥離物先端の速度は約55m/sで、実験結果と良い対応を示している。また、飛来物の先端に押されている部分の速度は飛来物とほぼ等速で、その他の大部分は、飛来物の残留速度の1/5以下である。剥離物の総重量は38kgfであった。このうち、飛来物の速度より速い部分と、ほぼ等速度の部分の

重量が約15%、速度が飛来物の残留速度の1/5以下の部分の重量が約60%となっている。

3.4 柔飛来物の解析結果

(1) RC板と飛来物の損傷状況

図-6に代表時刻における損傷状況を示す。各ケースとも飛来物は、剛飛来物の場合と同様に、剥離したコンクリートに包まれるように貫通していくが、かぶりコンクリートが先行して飛散するようなモードは見られない。RC板のクレーターの大きさは、T6Dでは衝突面22cm、裏面38cm、T8Dでは衝突面20cm、裏面48cm、T12Dでは衝突面27cm、裏面60cmであった。また、飛来物の損傷状況は、T6D、T8Dでは前半部のみが破損し、T12Dでは前半部が破損し後半部が若干座屈した結果となった。解析結果は衝突面におけるクレーターが多少大きめの結果であるが、図-2の実験結果と良い対応を示している。また、鉄筋の破断時刻は、T6Dでは上端筋0.24ms、下端筋0.36ms、T8Dでは上端筋0.38ms、下端筋0.56ms、T12Dでは上端筋0.86ms、下端筋1.11msであった。

(2) 飛来物の残留速度

図-7に飛来物先端および後端の速度時刻歴を示す。先端部の速度は各ケースとも衝突直後急激に減速した後、RC板の破壊にともなって増加していく。下端筋破断後は、前半部の破壊が進行している間、先端部の速度は増加し、破壊終了後、一定速度となる。一方、後端部の速度は飛来物の破壊にともなって減速し、破壊終了後一定速度となる。衝突してから一定速度となるまでに要する時間は、板厚が厚いほど短い。

図-8は、飛来物の貫通後の残留速度と剥離物先端の速度を示している。解析結果、実験結果とともに、ASCE式、Kar式による残留速度曲線も図示している。これらの評価式に必要な貫通限界厚さは、飛来物の柔性による低減係数を0.75⁵⁾として求めた。また、各ケースにおいて初速度、コンクリート強度がそれぞれ若干異なっているが、 $V=200$ m/s、 $f_c=260$ kgf/cm²として算定した。図-8より、解析結果は、実験結果および既往の評価式、特にKar式と良い対応を示している。RC板のクレータの形状が実験結果および解析結果では円錐台状であるのに対して、ASCE式では円柱状、Kar式では円錐台状と仮定しているため、Kar式の方が対応が良いと考えられる。

(3) 剥離物の速度と重量

表-4は、剥離物の飛散速度と重量の関係を示している。剥離物の速度は、剛飛来物の場合と同様に、飛来物の先端に押されている部分については飛来物とほぼ等速であるが、その他の部分は、その大部分が飛来物の残留速度の1/5以下である。剥離物の総重量はT6Dでは7.8kgf、T8Dでは9.4kgf、T12Dでは23.2kgfであった。このうち、飛来物とほぼ等速度の部分の重量が約15%、速度が飛来物の残留速度の1/5以下の部分の重量がT6Dでは約75%、T8DとT12Dでは約50%となっている。

4. まとめ

DEMを用いて、板厚の異なるRC板の剛および柔飛来物による貫通実験のシミュレーション解析を行った。その結果を以下に示す。

- ①剛飛来物、柔飛来物ともRC板貫通後の損傷状況および残留速度は、実験結果やKar式と良い対応を示しており、本手法が飛来物の強度に関係なく有効であることが確認された。
- ②RC板からの剥離物のうち、飛来物の残留速度とほぼ同じ速度を有するものは全剥離物重量の約15%程度であり、その他の大部分の速度は飛来物の残留速度に比べ1/5以下であることが解った。

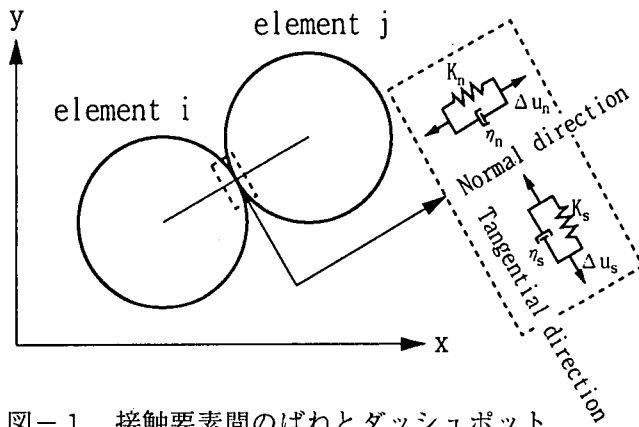


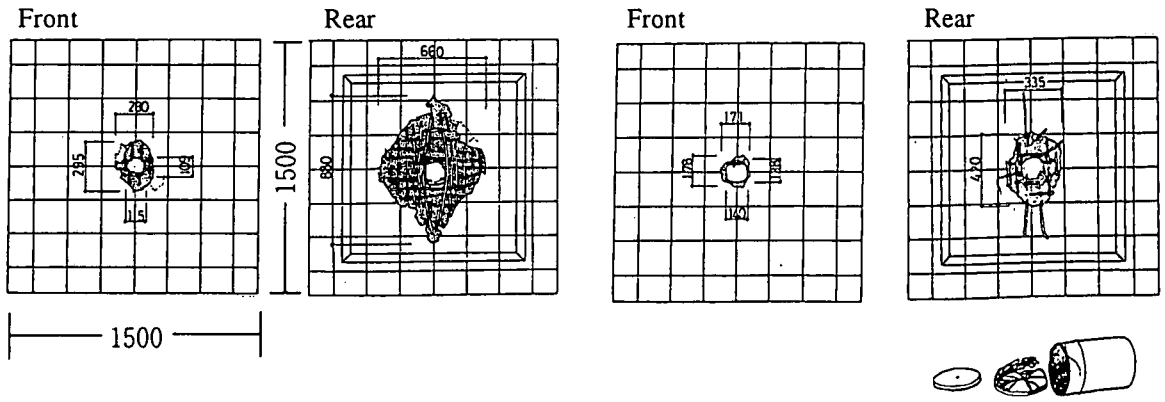
図-1 接触要素間のばねとダッシュポット

表-1 実験パラメータ

	飛来物種類	RC板厚 (cm)	鉄筋比 (%)	コンクリート圧縮強度 (kgf/cm ²)	衝突速度 (m/s)
T15R	剛	15	0.4	260	198
T06D	柔	6	0.4	279	196
T08D	柔	8	0.4	260	192
T12D	柔	12	0.4	285	204

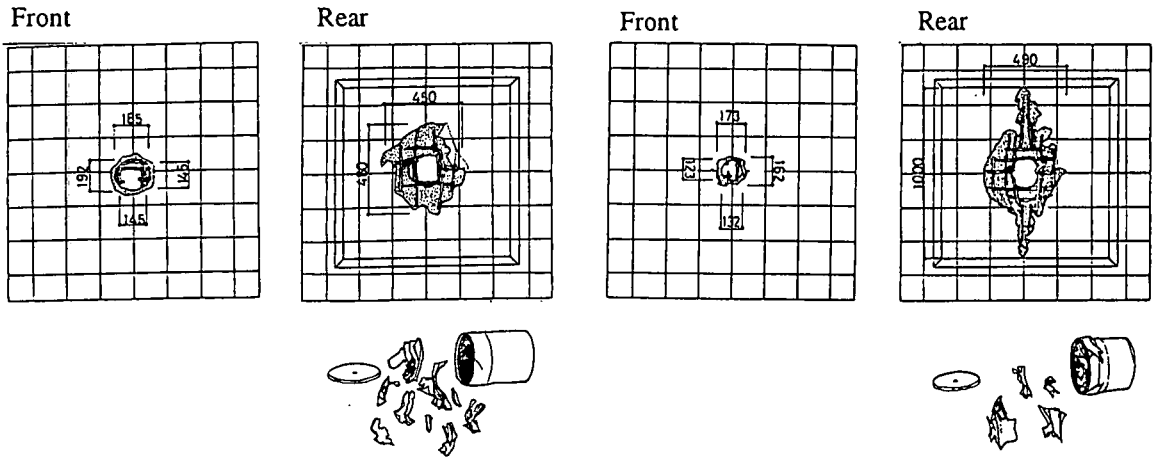
参考文献

- 1)Koshika,N. et al: 1992, Quantative Estimations of Local Damages on Concrete Structures under Impulsive Loadings, Proc.of ISIE
- 2)Morikawa,H. et al: 1993, Quantitative Studies on Impact Resistance of Reinforced Concrete Panels with Steel Liners under Impact Loading, Proc.of SMiRT-12
- 3)Sawamoto,Y. et al: 1995, Analytical Studies on Impact Penetration Behavior of Concrete Structures by Discrete Element Method, Proc.of SMiRT-13
- 4)森川博司 他: 1995.7, 個別要素法を用いたコンクリートの破壊解析, 日本建築学会構造系論文集 第473号
- 5)Sugano,T. et al: 1993, Local Damage to Reinforced Concrete Structures Caused by Impact of Aircraft Engine Missiles, Nuclear Engineering and Design 140
- 6)坪田張二 他: 1996.6, 縮尺模型と実物による鉄筋コンクリート板野衝撃実験と解析, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集
- 7)ASCE 1980. Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities
- 8)Kar,A.K: 1979, Residual Velocity for Projectiles, Nuclear Engineering and Design 53
- 9)Berriaud,C. et al: 1979, Test and Calculation of the Local Behavior of Concrete Structures under Missile Impact, Proc.of SMiRT-5
- 10)Seto,Y. et al: 1997, Analytical Studies on Impact Perforation Behavior on Reinforced Concrete Panels by Discrete Element Method, Proc.of SMiRT-14



T15R

T06D

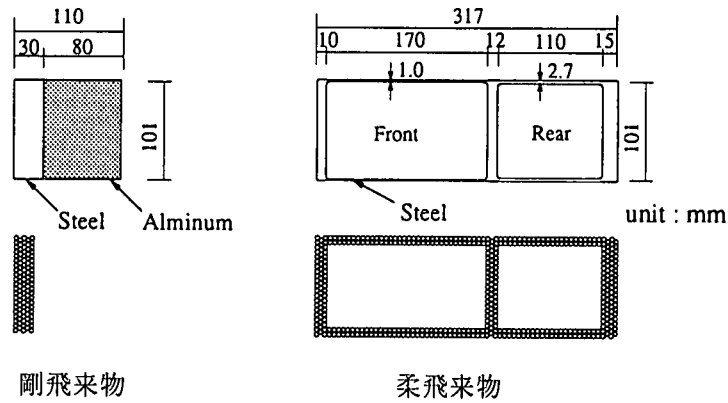


T08D

T12D

図-2 試験体の損傷状況

unit : mm



剛飛来物

柔飛来物

図-3 飛来物モデル

表-2 解析パラメータ

	飛来物			コンクリート				
	剛	柔		T15R	T06D	T08D	T12D	
		前半部	後半部					
要素半径	r	0.25	0.25	0.39	0.29	0.33	0.38	
法線方向ばね定数	K_n	$2.94E5 \times 2\pi b$	$1.09E5 \times 2\pi b$	$2.94E5 \times 2\pi b$	$1.89E5 \times 2\pi b$	$1.84E5 \times 2\pi b$	$1.89E5 \times 2\pi b$	$1.98E5 \times 2\pi b$
せん断方向ばね定数	K_s	$1.13E5 \times 2\pi b$	$4.19E4 \times 2\pi b$	$1.13E5 \times 2\pi b$	$6.32E4 \times 2\pi b$	$6.14E4 \times 2\pi b$	$6.32E4 \times 2\pi b$	$6.61E4 \times 2\pi b$
引張強度	F_t	∞	$231 \times 2\pi b$	$623 \times 2\pi b$	$18.57 \times 2\pi b$	$14.46 \times 2\pi b$	$15.57 \times 2\pi b$	$19.63 \times 2\pi b$
粘着力	C	∞	$133 \times 2\pi b$	$360 \times 2\pi b$	$30.82 \times 2\pi b$	$24.14 \times 2\pi b$	$25.84 \times 2\pi b$	$32.81 \times 2\pi b$
圧縮強度	F_c	∞	$231 \times 2\pi b$	$623 \times 2\pi b$	$204.57 \times 2\pi b$	$161.12 \times 2\pi b$	$171.55 \times 2\pi b$	$219.39 \times 2\pi b$
摩擦係数	μ	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.20	0.20

b:対称軸と要素中心との距離

unit : kgf, cm

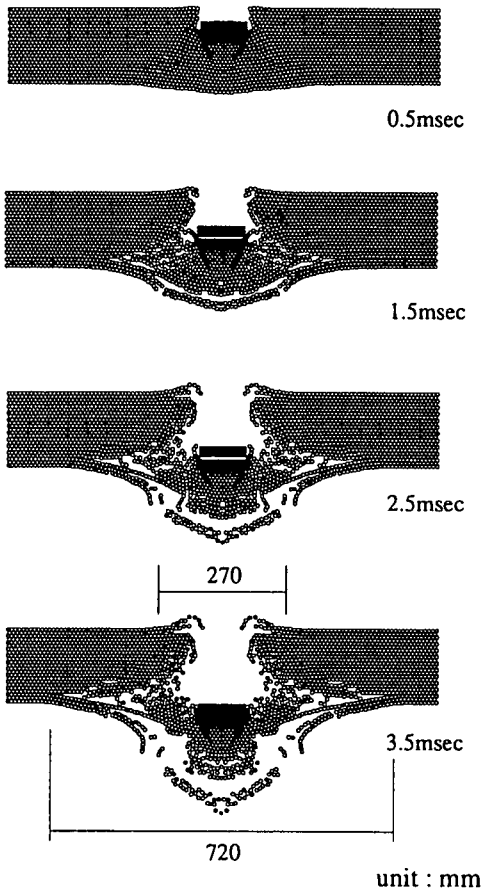


図-4 損傷状況 (剛飛来物)

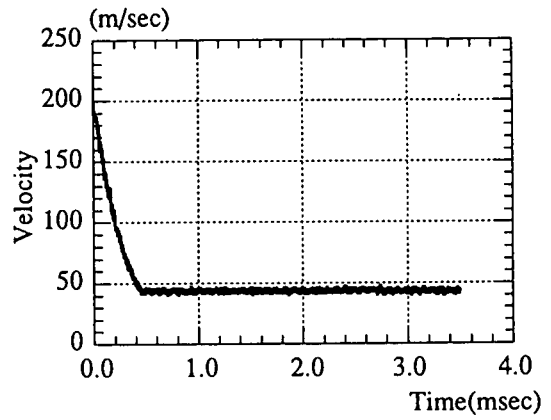


図-5 速度時刻歴 (剛飛来物)

表-3 剥離物の速度と重量 (剛飛来物)

速度(m/s)	T15R (kgf)
50 ~	1.1
40 ~ 50	1.6
30 ~ 40	3.2
20 ~ 30	1.4
10 ~ 20	6.3
~ 10	24.6
Total	38.2

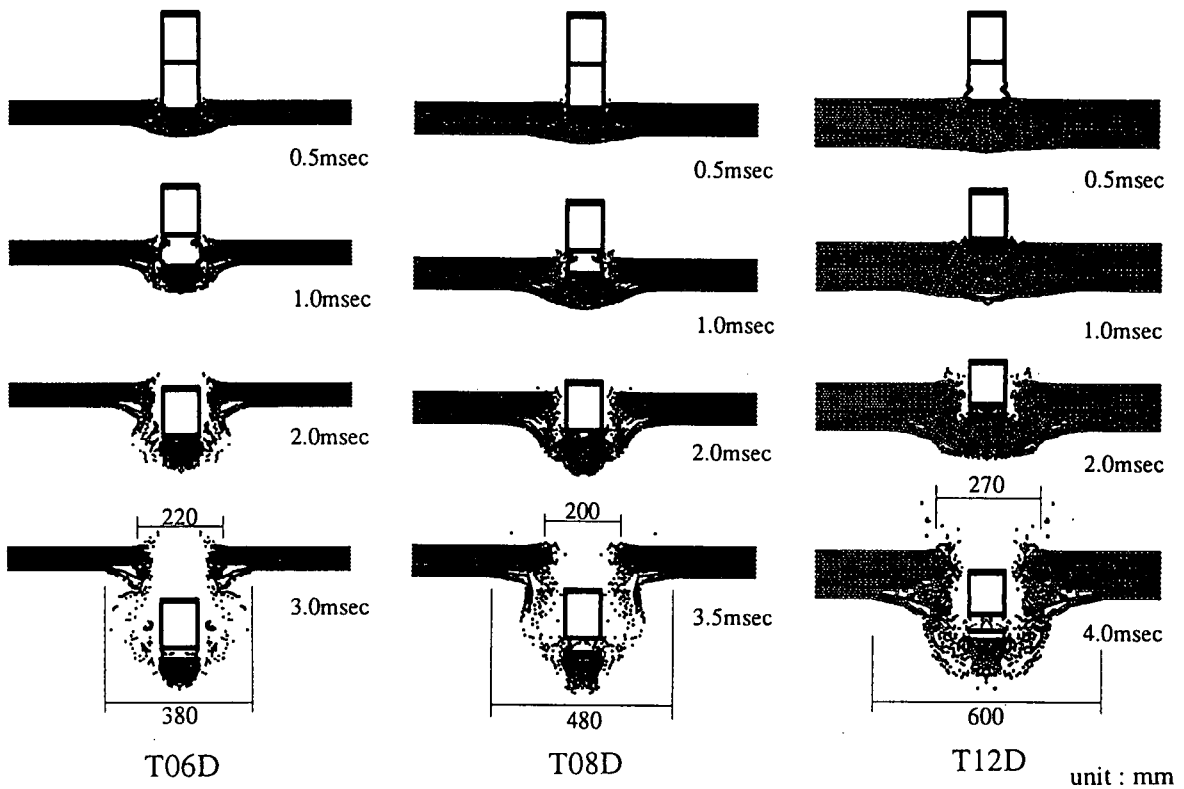


図-6 損傷状況 (柔飛来物)

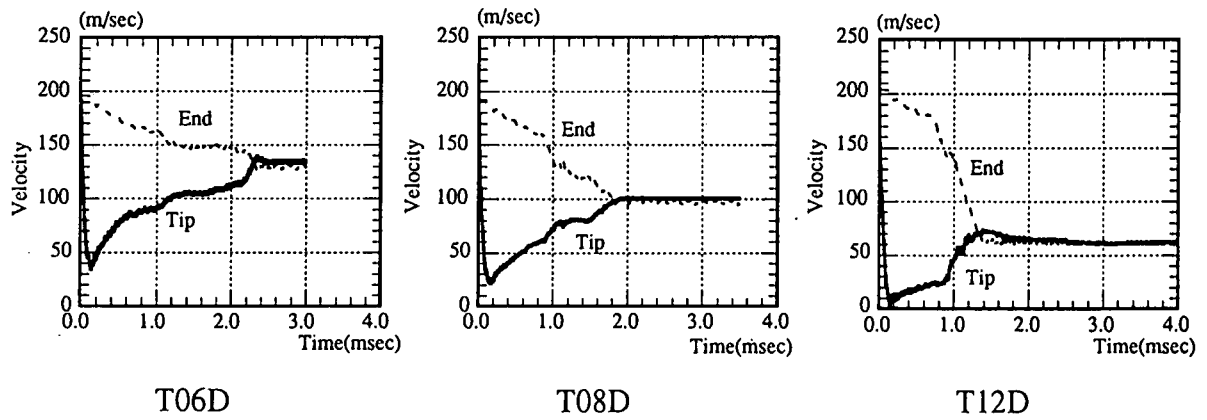


図-7 速度時刻歴 (柔飛来物)

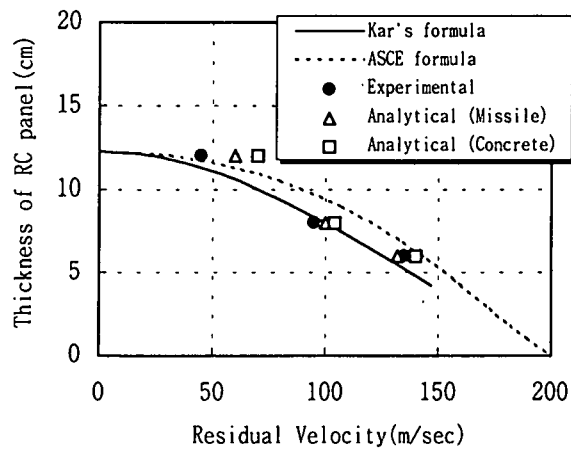


図-8 残留速度 (柔飛来物)

表-4 剝離物の速度と重量 (柔飛来物)

速度(m/s)	T06D(kgf)	T08D (kgf)	T12D (kgf)
120 ~	1.0		
110 ~ 120	0.0		
100 ~ 110	0.1	1.4	
90 ~ 100	0.0	0.2	
80 ~ 90	0.1	0.1	
70 ~ 80	0.2	0.2	
60 ~ 70	0.0	0.5	2.4
50 ~ 60	0.1	0.4	0.7
40 ~ 50	0.1	0.4	0.2
30 ~ 40	0.1	0.4	0.7
20 ~ 30	0.3	0.7	2.3
10 ~ 20	1.0	1.4	5.1
~ 10	4.7	3.8	11.8
Total	7.8	9.4	23.2