

小径高速飛翔体の斜め衝突によるコンクリート板の局部破壊と 粘弾性体による防護効果

Local damage of concrete plate caused by the oblique impact of hypervelocity small projectile
and the protective effect by viscoelastic materials

田中信行*, 大野友則**, 別府万寿博***

Nobuyuki TANAKA, Tomonori OHNO and Masuhiro BEPPU

* 防衛大学校理工学研究科前期課程学生 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 工博 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 博 (工) 防衛大学校助手 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

This study is to evaluate the local damage of concrete plate caused by the hypervelocity oblique impact of small projectile and to examine the protective effect by viscoelastic materials. To find the effects of impact angles, projectile velocity and other parameters on the local damage of concrete, a series of shooting tests is executed. And, to study the energy absorbing performance of viscoelastic materials for small projectile impact with hypervelocity, the different two types of viscoelastic materials were employed. From these test results, the formulae to estimate the local damage of concrete subjected to the hypervelocity oblique impact are presented.

*Key Words: hypervelocity small projectile, oblique impact, local damage,
viscoelastic material*

キーワード：小径高速飛翔体, 斜め衝突, 局部破壊, 粘弾性体

1. はじめに

火薬などの爆発物製造プラントにおける爆発事故や工事現場での発破あるいはテロ攻撃などによる爆破では、爆風圧だけでなく爆発物の破片や爆破された構造部材・材料の破片等が高速飛翔体となって周囲に飛散・衝突して、物的・人的被害が発生することが考えられる。一般に、飛翔体の衝突によるコンクリート構造物の破壊は、衝突条件（衝突体および被衝突体の質量、剛性、速度、形状など）によって構造全体の破壊と局部破壊に大別され、飛翔体が高速度で衝突する際には、飛翔体の持つ運動エネルギーが衝突部位の破壊（局部破壊）によって吸収される現象が生じることが知られている¹⁾。局部破壊が生じても直ちに構造物の崩壊につながることは無いが、場合によってはこれが構造物の機能喪失や人命の安全性を支配する要因となることがある。

高速飛翔体に対する構造物の安全性を検討あるいは防護設計を行う場合には、構造物に生じる局部破壊の程度を予測・評価する必要がある。このため、これまでに局部破壊の評価式が数多く報告されている¹⁾。しかしながら国内における既往の研究では、物体がコンクリート板部材に垂

直に衝突するケースを想定した場合が多く、飛翔体の衝突速度は最大で約 200m/s 程度である。一方、海外では現実により近い状況を想定し、衝突角度を変化させた斜め衝突に対する構造部材の安全性や衝突体の挙動を検討している例もある^{2)~5)}。

一方、局部破壊に対する防護性能を向上させる方法として、例えば、コンクリート板裏面に鋼ライナーで補強する方法⁶⁾、コンクリート板を2層構造としてその間に緩衝材や空隙を設ける方法^{7)~9)}、高強度コンクリートや繊維補強コンクリートを用いる方法が検討されている。これらのコンクリート部材自体を補強する方法は、局部破壊を防護する上で極めて有効ではあるが、反面で飛翔体をさらに破片化して飛散させることになる。

本研究は、約 300~920m/s の速度で飛翔する物体の衝突を対象とし、高速飛翔体の斜め衝突を受けるコンクリートの局部破壊について検討を行ったものである。また、コンクリート板の前面に設置した緩衝材を通過させることにより、飛翔体の運動エネルギーを減衰させてコンクリート板に生じる局部破壊を低減する方法についても検討を行った。実験では、コンクリート板厚、飛翔体の速度・質量および衝突角度を変化させ、コンクリート板の損傷状況に

火薬式高速飛翔体発射装置

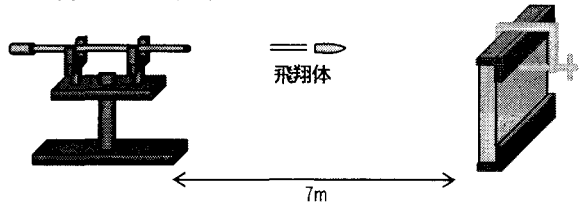
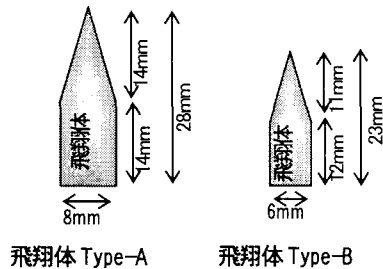


図-1 実験概要図



飛翔体 Type-A 飛翔体 Type-B

図-2 飛翔体タイプ

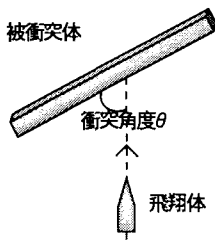


図-3 衝突角度

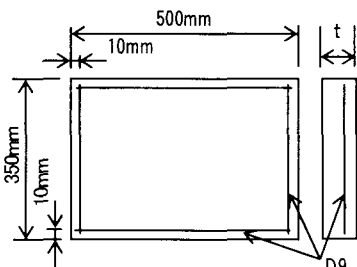


図-4 コンクリート板の概要

について検討を行った。また、緩衝材として用いた粘弾性体による飛翔体の運動エネルギー減衰効果について調べている。さらに、これらの結果に基づいて高速飛翔体がコンクリート面に対して斜め衝突する場合のコンクリートの局部破壊の評価式を定式化している。

2. 実験の概要

実験は、図-1 に示す火薬式小径高速飛翔体発射装置を用い、約7m離れた位置にコンクリート板供試体を設置した。コンクリート板は鋼製の反力フレーム内に上下2辺をL型鋼で支え、クランプを用いて固定した。実験は、①コンクリート板の局部破壊に関する実験、②粘弾性体によるエネルギー減衰効果に関する実験および③粘弾性体とコンクリート板の組合せ効果に関する実験の3種類を行っている。

2.1 コンクリート板の局部破壊に関する実験

コンクリート板の局部破壊に関する実験のパラメータは、飛翔体の種類・衝突速度・衝突角度およびコンクリート板厚とした。飛翔体は、図-2 に示す Type-A (直径：約8mm、長さ：約28mm、質量：約10g、鉛製、先端は先鋭状) および Type-B (直径：約6mm、長さ：約23mm、質量：約4g、鉛製、先端は先鋭状) の2種類を用いた。飛翔体の衝突角度は、図-3 に示すように試験体表面から射

表-1 コンクリート配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材	粗骨材	混和剤
20	15	49	44.7	167	341	793	1011	3.41

表-2 コンクリート板に対する実験ケース

飛翔体種類	衝突角度 (°)	衝突速度 (m/s)	コンクリート厚 (cm)
TYPE-A	10, 15, 20, 25, 30, 45, 60	700	3
		300	3, 5, 7
	90	500	
		700	
TYPE-B	10, 15, 20, 25, 30, 45, 60	920	7
		400	3, 5, 7
	90	700	3, 5, 7, 10
		920	5, 7, 10

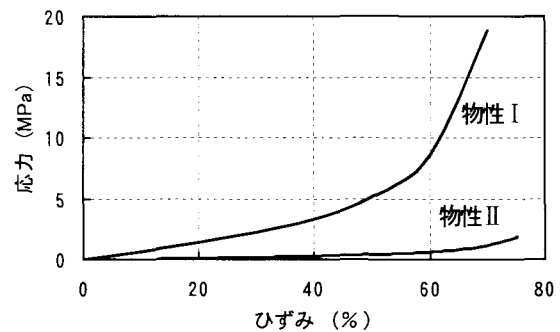


図-5 粘弾性体の圧縮試験結果

線のなす角 θ として定義し、 $10^\circ \sim 90^\circ$ の間で実験を行っている。斜め衝突実験における飛翔体の衝突速度は、Type-A で700m/s、Type-B で920m/sである。なお、衝突角度が 90° の場合は速度を変えて、衝突速度の違いによる影響について調べた。

本実験で用いたコンクリート板試験体のコンクリートには、普通ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの配合を、表-1 に示す。コンクリート板試験体は、圧縮強度： 28.5N/mm^2 、寸法： $500\text{mm} \times 350\text{mm} \times t$ (板厚)で、板厚 t は3, 5, 7, 10cmの4種類である。鉄筋は、試験体搬送中に損傷しないようにD9鉄筋を周辺拘束用として配置した。コンクリート板の寸法を、図-4 に示す。また、実験ケースを表-2 に示す。

計測項目は、飛翔体の衝突速度、コンクリート板表面の損傷 (大きさ：縦×横および深さ) である。衝突速度は、速度検知紙を2枚設置し、50cm離隔して設置した2枚の速度検知紙間を飛翔体が通過する時間から求めた。

2.2 粘弾性体によるエネルギー減衰効果に関する実験

粘弾性体によるエネルギー減衰効果に関する実験は、粘弾性体単体によるエネルギー減衰に関する実験および粘弾性体を前面に設置したことによるコンクリート板の破壊に関する実験を行っている。粘弾性体は、図-5 に示すように静的物性 (圧縮荷速度： $8.33 \times 10^{-5}\text{m/s}$) が異なる2種類 (物性 I、物性 II) を用いた。物性 I は硬度65、物

表-3 粘弾性体に対する実験ケース

飛翔体種類	Type-A		Type-B	
衝突速度	700m/s		920m/s	
	物性Ⅰ	物性Ⅱ	物性Ⅰ	物性Ⅱ
粘弾性体厚 (cm)	5.5	10.3	5.5	11
	11	15.5	11	16
	16.5	20	13	21.5

表-4 粘弾性体付きコンクリート板に対する実験ケース

飛翔体種類	衝突角度 (°)	衝突速度 (m/s)	コンクリート厚 (cm)	粘弾性体厚 (cm)
Type-A	15, 30	700	5	物性Ⅰ : 3
	45, 60, 90			物性Ⅱ : 5
Type-B	15, 30	920	5	物性Ⅰ : 3
	45, 60, 90			物性Ⅱ : 5

性Ⅱは硬度 40 のゴムゲルである。なおゴムゲルとは、固体状でありながら熱条件などの変化により流動性を示す性質を有するゴムであり、一般ゴムと区別するための便宜的な呼称として用いた。粘弾性体単体の実験に用いた供試体は、厚さ 5cm で正方形：縦 250mm×横 250mm に成形したものである。5cm 以上の厚さの試験においては水平方向に所要数を並置して調整した。また、コンクリート板の前面に設置する試験体は、粘弾性体単体の実験結果に基づいて同程度のエネルギー減衰効果を有するように厚さを決定した。その結果、物性Ⅰおよび物性Ⅱの厚さはそれぞれ 3cm と 5cm となった。飛翔体は、コンクリート板に対する実験と同一であり、衝突角度は 15°～90°の間で実験を行った。それぞれの実験に関する実験ケースを、表-3 および表-4 に示す。

本研究は、小径飛翔体の高速衝突に対するコンクリートの局部破壊の問題を主眼としており、計測機器の制約も考慮して、飛翔体の衝突速度、粘弾性体を貫通した後の速度およびコンクリート板表面の局部破壊状況（損傷幅、深さ）の計測を実施した。

3. 斜め衝突を受けるコンクリート板の局部破壊の評価

ここでは、700 および 920m/s の速度で小径高速飛翔体が衝突するときにコンクリート板に生じる局部破壊状況を調べるため、まず垂直衝突（90°）に対する局部破壊について検討する。次に、コンクリート板厚を一定（7cm）として、斜め衝突に対するコンクリート板の破壊状況や損傷評価式について検討を行う。

3.1 垂直衝突に対するコンクリート板の局部破壊状況

写真-1 に、Type-B 飛翔体（衝突速度：720m/s、実測値）に対するコンクリート板の破壊状況を示す。写真を見ると、表面破壊だけが生じる場合（写真-1(a)）と裏面剥離が生じる場合（写真-1(b)）とでは、衝突面に生じる破壊の程度や深さはほぼ同等であることがわかる。また、コンクリート板に生じる局部破壊は、板厚が小さくなるにつれて表面破壊、裏面剥離、貫通の 3 種類が生じている。図-6 に、コンクリート板の局部破壊を衝突速度と板厚の関係中に示している。これより、図-6(a)に示す Type-A 飛翔体対

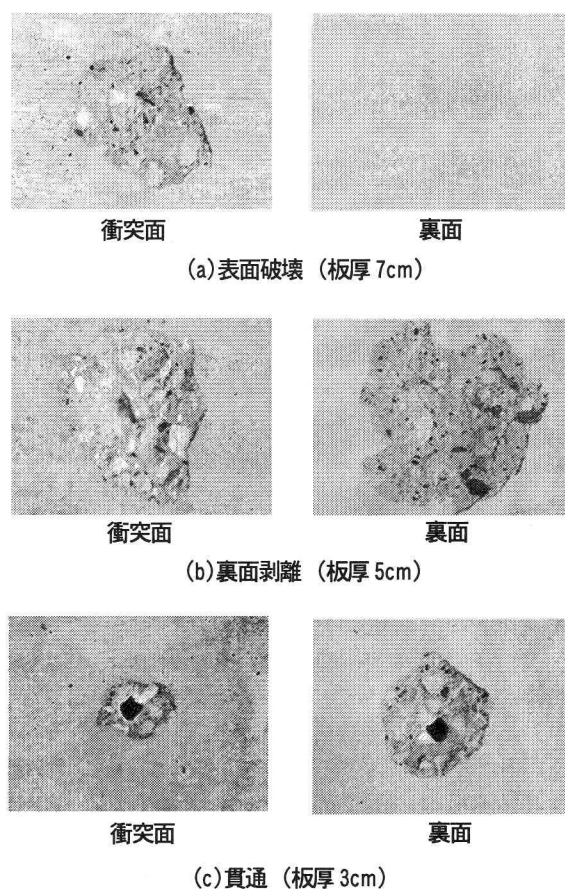


写真-1 コンクリート板の破壊状況
(Type-B, 720m/s)

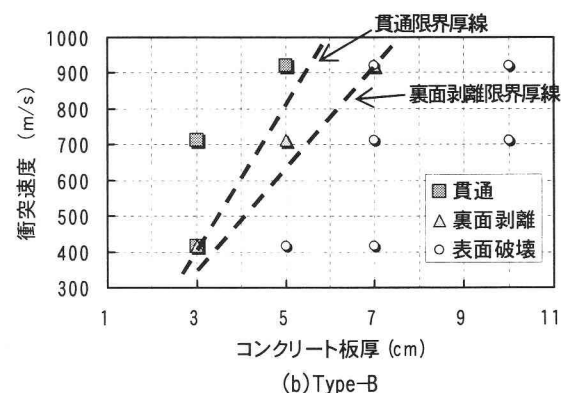
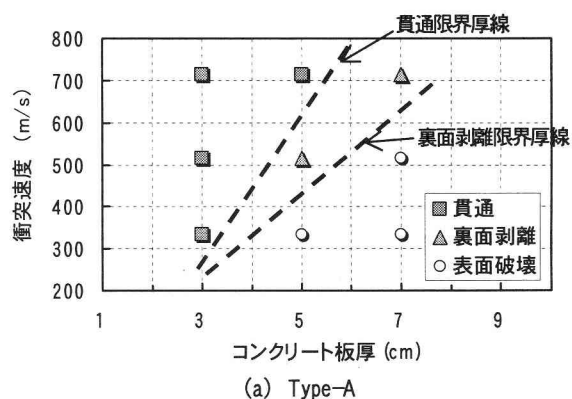
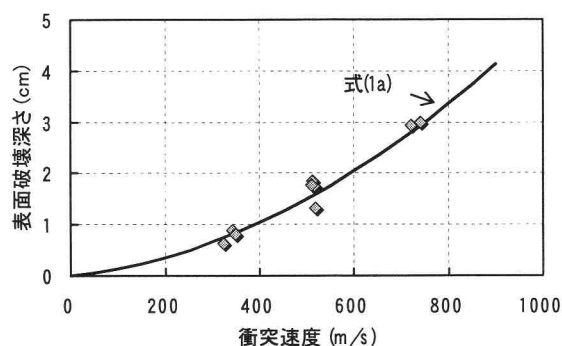
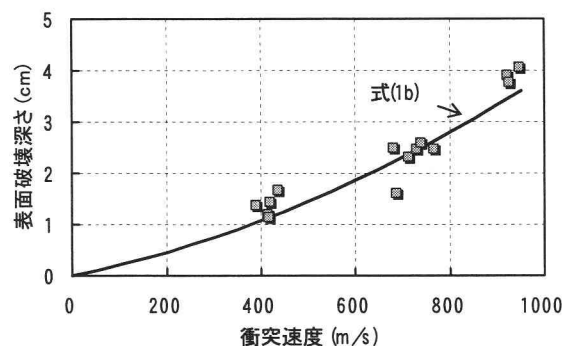


図-6 コンクリート板厚と衝突速度の関係における局部破壊



(a) Type-A, 垂直衝突



(b) Type-B, 垂直衝突

図-7 表面破壊深さと衝突速度の関係

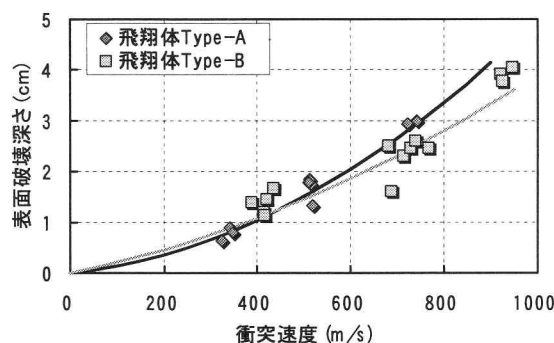


図-8 表面破壊深さと衝突速度の関係(全ケース)

しては、衝突速度が700m/s のとき、板厚5cm と7cm の間
がコンクリート板の貫通限界厚であることがわかる。また、
衝突速度が500m/s の場合は、貫通限界厚が3cm と5cm の
間、裏面剥離限界厚が5cm と7cm の間にあることがわか
る。図-6(b)に示す Type-B 飛翔体に対する結果も Type-A
と同じ傾向であり、衝突速度が大きくなるほど、表面破壊
→裏面剥離→貫通と局部破壊が増大することがわかる。一
方、Type-A およびType-B のいずれに対しても、コンク
リート板厚が大きくなるにしたがって、局部破壊は貫通から
表面破壊へと軽微になっている。

3.2 表面破壊と衝突速度の関係

図-7 に、Type-A および Type-B 飛翔体がコンクリート板
に垂直衝突したときの表面破壊深さと衝突速度の関係を
示す。なお、図中に示す実線は、実験結果に基づいて得ら
れた回帰式による算定値であり、次式で与えられる。

$$\text{Type-A: } x = 4.0 \times 10^{-6} V^2 + 0.01V \quad (R = 0.9802) \quad (1a)$$

$$\text{Type-B: } x = 2.0 \times 10^{-6} V^2 + 0.0019V \quad (R = 0.9522) \quad (1b)$$

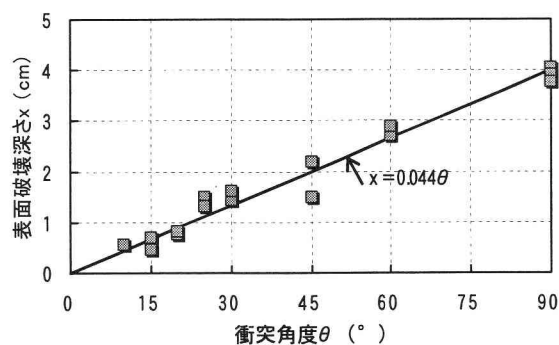


図-9 衝突角度と表面破壊深さの関係
(TYPE-B)

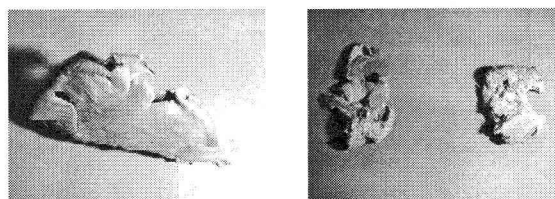


写真-2 飛翔体の破壊の状況

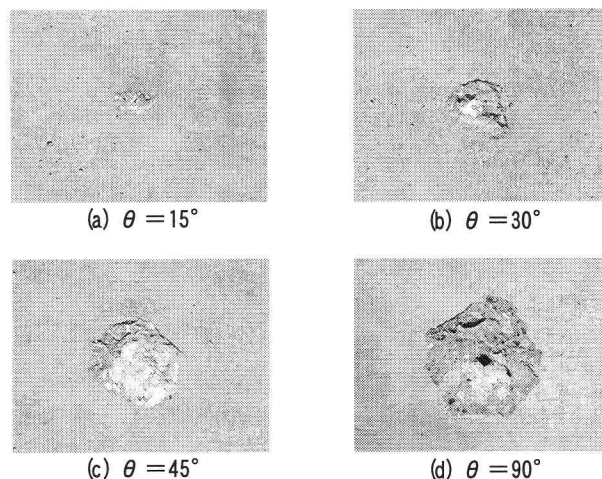


写真-3 衝突角度による破壊状況の相違
(Type-B, コンクリート厚7cm, 900m/s)

ここで、 x は表面破壊深さ(cm)、 V は衝突速度(m/s)、 R は
回帰式の相関係数である。

図から、いずれの飛翔体に対しても、飛翔体の衝突速度
が大きくなるにつれて表面破壊の深さが増加する傾向が
認められる。図-8 に、Type-A と Type-B 飛翔体の両実験結
果を重ねて示す。図から、Type-A 飛翔体と Type-B の表面
破壊深さと衝突速度の関係はほぼ等しい傾向を示し、衝突
速度が500m/s 程度までは一つの式で評価できることがわ
かる。

ここで、試験体に生じる表面破壊深さは衝突体の運動エ
ネルギーの大きさに依存すると考えると、同じ衝突速度で
は飛翔体質量が2.5 倍大きい Type-A 飛翔体の方が Type-B
より運動エネルギーが2.5 倍大きいので、Type-A に対する
破壊の方が大きくなると推測される。しかしながら、実験
では破壊状態や表面破壊深さはほぼ等しい結果となった。
つまり、飛翔体の質量の大きさによる影響が現れなかった。
本実験で用いた2種類の飛翔体は、写真-2 に示すように、
いずれもコンクリート板に衝突した直後に飛翔体自身が

表-5 表面破壊寸法

衝突角度(°)	縦(mm)	横(mm)	深さ(mm)
15	23	40	5
30	51	56	14
45	77	88	22
90	101	101	41

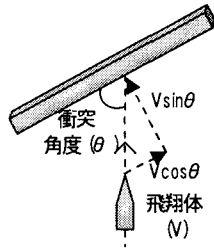


図-10 速度成分

変形・破壊を生じた。すなわち、いわゆる柔飛翔体であり被衝突体に対する相対的な剛さが柔である衝突体が衝突する場合は、速度が数 100m/s 以上になると質量よりも速度の方が破壊に大きな影響を与えるため、飛翔体質量に 2.5 倍程度の差があっても、コンクリートの表面破壊深さに大きな差が生じなかったものと考えられる。

3.3 飛翔体の衝突角度の影響

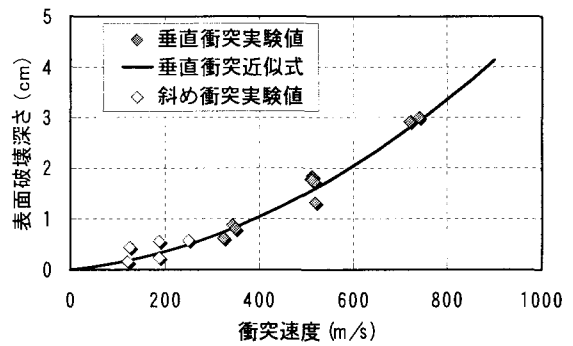
ここでは、衝突速度が大きい Type-B 飛翔体を用いて、衝突角度がコンクリート板（厚 7cm）の局部破壊に及ぼす影響を調べた。写真-3 に、衝突角度 15°、30°、45°、90° における表面破壊の状況を示す。また表-5 に、それぞれの角度における表面破壊の寸法（縦、横、深さ）を示す。図-9 には、表面破壊深さ x (cm) と衝突角度 θ (°) の関係を示す。図を見ると、両者の間にはほぼ比例関係が認められる。そこで、1 次式を仮定して回帰式を求めると、次式が得られる。

$$x = 0.044 \theta \quad (2)$$

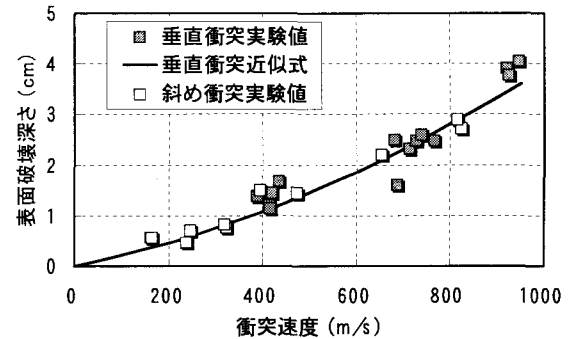
ここで、コンクリート板表面に対する斜め衝突問題において、実衝突速度を法線方向の速度 $V \sin \theta$ （図-10 参照）を用いて垂直成分に補正し、前節で行った垂直衝突との比較検討を行う。図-11 に、飛翔体の斜め衝突および垂直衝突の全試験ケースにおける表面破壊深さと衝突速度の関係を示す。これより、斜め衝突を垂直成分に補正した実験結果は、垂直衝突に対する実験式（式（1））による算定結果とほぼ一致していることがわかる。すなわち、飛翔体がコンクリート板に斜め衝突する場合の表面破壊深さは、垂直衝突の表面破壊深さ評価式に、法線方向成分の速度補正值を入力することにより推定できると言える。

3.4 既往の局部破壊評価式による予測

飛翔体がコンクリート板に衝突した時の局部破壊（表面破壊深さ、裏面剥離限界厚、貫通限界厚）を評価するために、種々の評価式が提案されている¹⁾。その中の代表的な式の一つとして、修正 NDRC 式¹⁰⁾がある。本研究の実験条件は、修正 NDRC 式の適用範囲内であるので（ V_0 : 152.4 ~ 914.4m/s, D : ~40.64cm, W/D^3 : 0.014 ~ 0.056kg/cm³），以下に示す修正 NDRC 式を準用して斜め衝突に対するコ



(a) Type-A



(b) Type-B

図-11 表面破壊深さと衝突速度の関係

ンクリート板の損傷を評価する。

1) 表面破壊深さ：

$$x = 3.89946 \cdot 10^{-3} \sqrt{NWD(V_0/D)^{1/8}} / \sqrt{f'_c} \quad : x < 2D$$

$$x = \left\{ 3.7873 \cdot 10^{-6} NW(V_0/D)^{1/8} / \sqrt{f'_c} \right\} + D \quad : x \geq 2D \quad (3a)$$

2) 裏面剥離限界厚：

$$s = 7.91x - (5.06x^2/D) \quad : s < 0.65D$$

$$s = 2.12D + 1.36x \quad : s \geq 0.65D \quad (3b)$$

3) 貫通限界厚：

$$e = 3.19x - (0.718x^2/D) \quad : x > 1.35D$$

$$e = 1.32D + 1.24x \quad : x \geq 1.35D \quad (3c)$$

ここに、 x ：表面破壊深さ（cm）、 s ：裏面剥離限界厚、 e ：貫通限界厚、 N ：先端形状係数、 W ：飛翔体の質量（kg）、 D ：飛翔体の直径（cm）、 V_0 ：飛翔体の衝突速度（cm/s）、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度（N/mm²）である。

本実験の条件は、先端形状係数 N ：1.14（飛翔体の先端が非常に鋭い）、飛翔体の質量 W ：Type-A: 0.01kg, Type-B: 0.004kg、飛翔体の直径 D ：Type-A: 0.8cm, Type-B: 0.6cm、衝突速度 V_0 ：Type-A: 700m/s, Type-B: 920m/s、である。コンクリートの圧縮強度 f'_c ：28.5N/mm²を式（3）に代入すると、Type-A に対しては、表面破壊深さ：8.06cm、裏面剥離限界厚：12.58cm、貫通限界厚：11.00cm となる。また Type-B に対しては、表面破壊深さ：10.57cm、裏面剥離限界厚：15.55cm、貫通限界厚：13.83cm となる。これらの推定値はいずれも、実験値を過大に評価している。これは、修正 NDRC 式が剛飛翔体（衝突しても変形・破壊が生じ

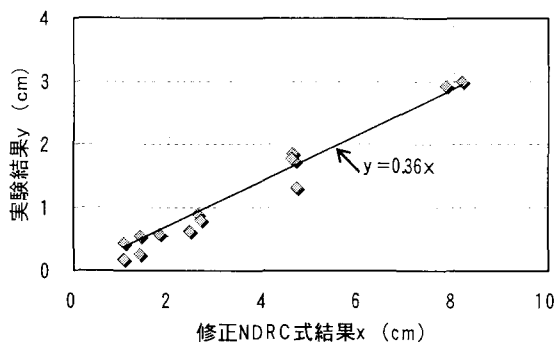
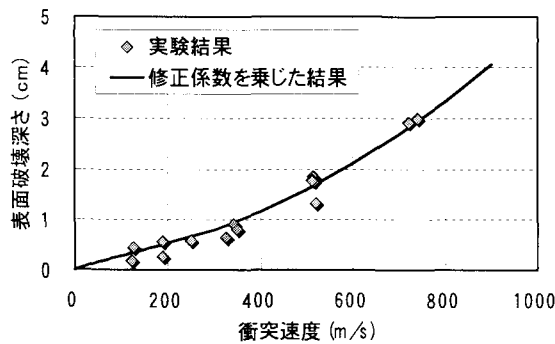
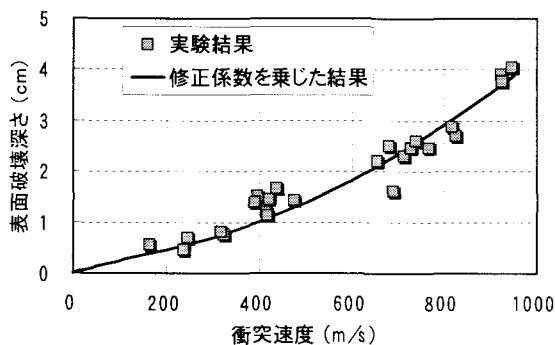


図-12 実験結果と修正 NDRC 式結果の関係



(a) Type-A



(b) Type-B

図-13 修正係数を乗じた修正 NDRC 式と実験結果の比較

ない)を用いた実験に基づいて提案されたものであるためであり、本実験で用いた柔飛翔体に対してはそのままでは適用できないことを表している。そこで、既往の修正 NDRC 式に、飛翔体の剛さを表す係数(本研究では、柔係数と定義する)を乗じて修正することにした。

以下に柔係数の算定方法を示す。まず、図-12 に示すように、縦軸は Type-A を用いた実験結果、横軸はその実験結果に対応する衝突速度を修正 NDRC 式に代入して得られた算定結果とする。この関係に対して 1 次の回帰式を求めると式(4a)が得られる。

$$y = 0.36x \quad (\text{相関係数 } R = 0.9812) \quad (4a)$$

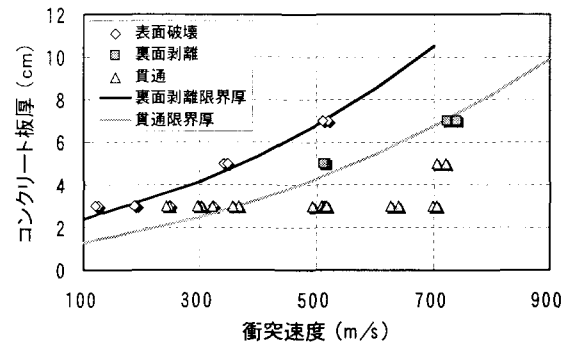
この直線の傾きが柔係数を表している。Type-B の結果に対しても同様にして 1 次の回帰式を求めると、式(4b)が得られる。

$$y = 0.43x \quad (\text{相関係数 } R = 0.966) \quad (4b)$$

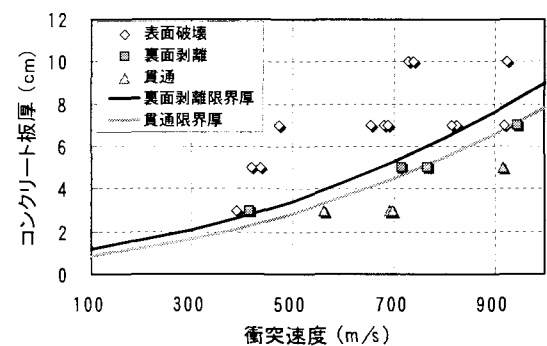
すなわち、本実験結果と修正 NDRC 式による算定値を等価にするために必要な柔係数は Type-A、Type-B でそれ

表-6 修正 NDRC 式に乘じる修正係数

	表面破壊 深さ	裏面剥離 限界厚	貫通限界 厚
Type-A	0.36	0.89	0.66
Type-B	0.43	0.6	0.61



(a) Type-A



(b) Type-B

図-14 局部破壊状況と衝突速度の関係

ぞれ、0.36 および 0.43 となる。図-13 に、Type-A および Type-B の実験結果と修正 NDRC 式に柔係数を乗じて得られた算定結果(実線)の関係を示す。図から、修正 NDRC 式に飛翔体の剛さを表す柔係数を乗じれば、表面破壊深さが評価できることが認められる。

同様に、裏面剥離限界厚および貫通限界厚についても修正係数を求めた。それぞれの柔係数値を表-6 に、柔係数を乗じて算定した Type-A、Type-B の衝突速度と裏面剥離限界厚・貫通限界厚の関係を示す。図-14 に示す。Type-A と Type-B の飛翔体は、大きさが異なるが主材質がいずれも鉛であるので、柔係数値はほぼ等しい値を示している。

4. 粘弾性体によるエネルギー減衰効果に関する検討

前章では、小径高速飛翔体がコンクリート板に直接衝突する場合の局部破壊について検討を行った。その結果、柔飛翔体の高速度衝突(数 100m/s 以上)では、コンクリートに生じる局部破壊は質量の大きさよりも速度が支配的要因となることがわかった。そこで、飛翔体が有する運動エネルギーが粘弾性体材料によってどの程度減衰されるかを調べ、粘弾性体によるコンクリート板に生じる局部破壊の低減効果について検討する。

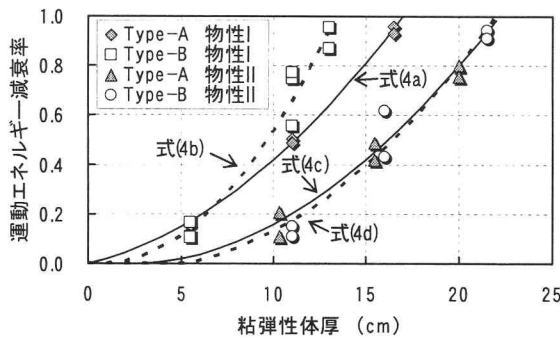


図-15 運動エネルギー減衰率と粘弾性体厚の関係

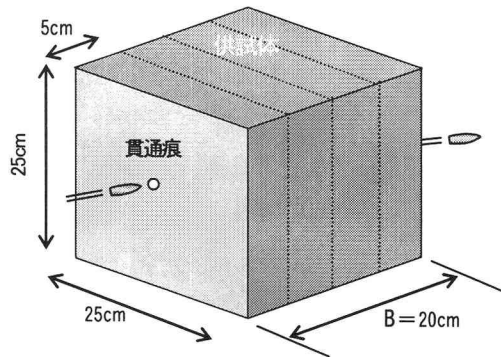


図-16 粘弾性体中を貫通する飛翔体の状況

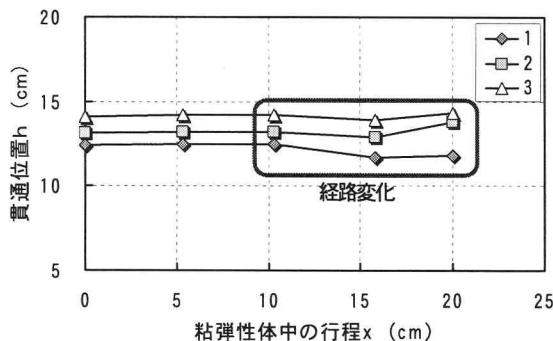


図-17 飛翔体の貫通経路(物性Ⅱ)

4.1 粘弾性体による運動エネルギー減衰

図-15 に、運動エネルギー減衰率 $(=1 - E_r/E_i)$ (E_r は、衝突後の残留運動エネルギー、 E_i は衝突前の運動エネルギー) と粘弾性体厚の関係を示す。減衰率が0のときは飛翔体の運動エネルギーが減衰することなく貫通することであり、1は試験体を貫通しないことを表す。図-15には、エネルギー減衰率と粘弾性体厚の関係を表す以下の回帰式による算定結果も併せて示している。

1) 物性Ⅰの場合

a. Type-A

$$1 - E_r/E_i = 1 - (V_r/V_i)^2 = 0.0024B^2 + 0.0018B \quad (R = 0.9989) \quad (5a)$$

b. Type-B

$$1 - E_r/E_i = 1 - (V_r/V_i)^2 = 0.0061B^2 - 0.0075B \quad (R = 0.9776) \quad (5b)$$

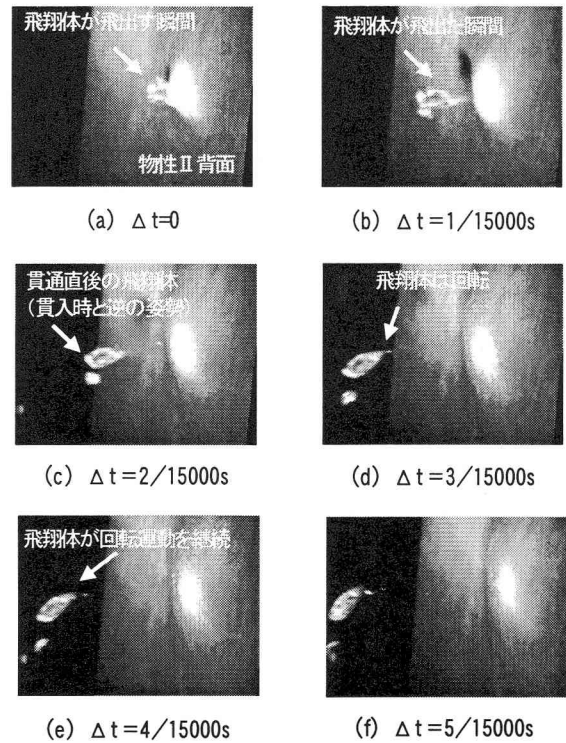


写真-4 貫通後の飛翔体の挙動
(TYPE-A, 物性Ⅱ, 700m/s)

2) 物性Ⅱの場合

a. Type-A

$$1 - E_r/E_i = 1 - (V_r/V_i)^2 = 0.0024B^2 - 0.008B \quad (R = 0.9888) \quad (5c)$$

b. Type-B

$$1 - E_r/E_i = 1 - (V_r/V_i)^2 = 0.0027B^2 + 0.014B \quad (R = 0.9772) \quad (5d)$$

ここで、 V_r は貫通後の残留速度、 V_i は貫通前速度、 B は粘弾性体厚(cm)、 R は回帰式の相関係数である。

図-15 から、粘弾性体厚が増加するにしたがって、飛翔体のエネルギー減衰率が増加することが認められる。また、同じ厚さであれば、物性Ⅱよりも硬度が高い物性Ⅰの方が、エネルギー減衰率は大きいことがわかる。高い硬度は粘弾性体が硬いことを表しており、この硬さが飛翔体に対する貫通抵抗力を増大させていることによると考えられる。また、物性Ⅱでは顕著にその傾向は認められないが、物性Ⅰの場合にはType-AよりType-B飛翔体の方がエネルギー減衰率が大きくなっている。この原因は明確ではないが、飛翔体の形状・寸法の相違による影響が現れていると考えられる。

図-16 は、試験に用いた粘弾性体と飛翔体の貫通状態を模式的に示したものである。図-17 に、Type-A 飛翔体が物性Ⅱの粘弾性体中を貫通するときの経路を示している。図から、飛翔体が粘弾性体に10cm程度貫入した付近から経路に変化が生じていることがわかる。写真-4は、飛翔体が粘弾性体を貫通して外に飛び出した直後の状況を、撮影速度1/30,000の高速ビデオカメラで撮影したものである。また、写真-4(a)～(f)は1/15,000秒間隔の飛翔体の挙動を示した連続写真である。写真-4(b)は、粘弾性体の背面から

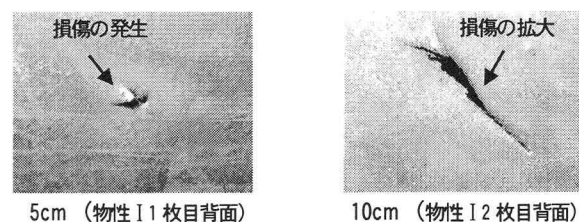
飛翔体が飛び出す瞬間を示している。このとき、粘弾性体に右方向から貫入した飛翔体が、前後の向きを180°反転した状態で貫通していることがわかる。これは、飛翔体が粘弾性体中で回転運動を行ったことを示している。また、写真-4(a)～(f)に示す連続状況から、飛翔体は貫通して外に飛び出した後も回転運動を続けていることがわかる。写真-5は、粘弾性体の衝突位置（入り口）から5cm、10cmの位置に生じた物性Ⅰと物性Ⅱそれぞれの損傷の様子を拡大表示したものである。写真-5(a)に示す物性Ⅰでは、飛翔体が粘弾性体を5cm貫通する時に回転運動したために裂傷が生じたものと推察できる。一方、写真-5(b)に示す物性Ⅱの場合は、5cm位置では貫通痕がほとんど残らず、10cm位置で裂傷が生じている。すなわち、物性Ⅱでは10cm程度において飛翔体に回転運動が生じていることが推察できる。これは、図-18に示すように、図-15の各実験結果を2本の1次回帰式で表したとき、物性Ⅰは厚み5cm程度、物性Ⅱは10cm程度以上において、エネルギー減衰効果が急に増大していることと対応している。したがって、粘弾性体によるエネルギー減衰効果は、飛翔体の回転運動による抵抗と経路変化による抵抗の相乗効果によるものと考えられる。

4.2 粘弾性体によるコンクリート板の防護効果

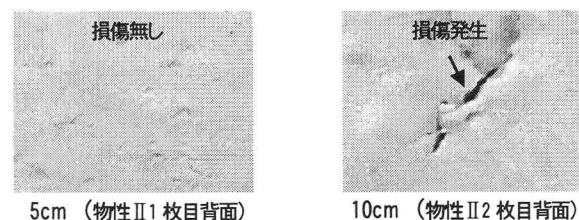
図-15に示したように、物性ⅠまたはⅡの粘弾性体を用いて高速飛翔体（質量：0.004～0.01kg、速度：700～920m/s）の運動エネルギーを完全に吸収するためには、厚さ15～25cmが必要であることがわかる。本節では、より実用的な観点から、粘弾性体とコンクリートの接触界面における損傷・破壊状況を確認するために、コンクリート板の前面に粘弾性体を接触設置して実験を行った。設置に際しては、粘弾性体をコンクリート板表面に両面テープで接着した。衝突角度は15°、30°、45°、60°、90°（垂直）の5段階である。

図-19には、①コンクリート板のみ、②物性Ⅰ（3cm厚）とコンクリート板、③物性Ⅱ（5cm厚）とコンクリート板、のそれぞれに飛翔体が斜め衝突したときコンクリート板に生じた表面破壊深さと衝突角度の関係を示している。図中には、コンクリート板のみの結果に対して求めた回帰式による算定値も示している。②と③の試験において、Type-AおよびType-Bの飛翔体が角度15°で衝突した場合は、いずれの試験に対してもコンクリート板には破壊がまったく生じなかった。衝突角度が15°の場合、飛翔体の貫通行程距離 l は $l = B/\sin\theta$ （ B ：粘弾性体厚）となり、物性Ⅰでは11.6cm（ B ：3cm）、物性Ⅱでは19.3cm（ B ：5cm）と実際の厚さよりもかなり長くなる。このため、粘弾性体中を飛翔体が貫通する途中で経路変化を生じて、コンクリート面に到達しなかったものと考えられる。したがって、図-19中には衝突角度15°に対する結果は示していない。

図-19(a)から、Type-A飛翔体で衝突角度が30°～90°の場合、コンクリート板に3cm厚の物性Ⅰあるいは5cm厚の物性Ⅱを取付けても、コンクリート板の表面破壊深さに差異が生じていないことがわかる。一方、Type-B飛翔



(a) 物性Ⅰ (TYPE-A, 700m/s)



(b) 物性Ⅱ (TYPE-A, 700m/s)

写真-5 粘弾性体の損傷状況

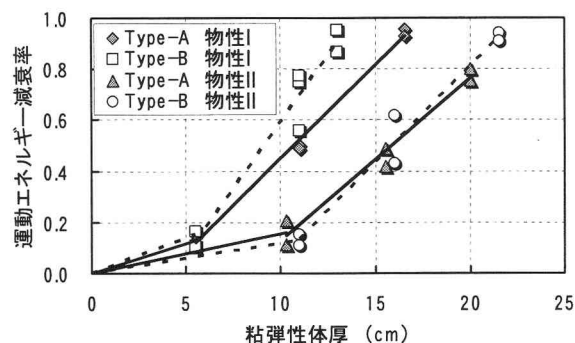
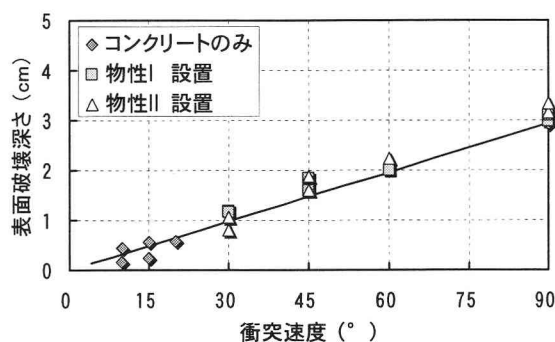
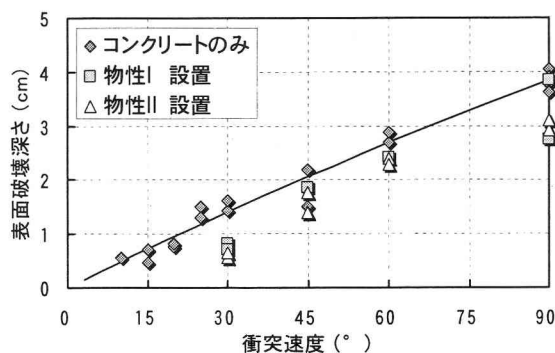


図-18 運動エネルギー減衰率と粘弾性体厚の関係



(a) Type-A, 斜め衝突



(b) Type-B, 斜め衝突

図-19 表面破壊深さと衝突速度の関係

体で衝突角度 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の場合は、コンクリート板に粘弾性体を取付けることにより、図-19(b)に示すように表面破壊深さが小さくなることが認められた。Type-B 飛翔体に対して、3cm 厚の物性Ⅰを用いた場合は、コンクリート板のみに飛翔体が衝突した場合よりも表面破壊深さが約 26%、5cm 厚の物性Ⅱを用いた場合は約 33%減少している。

4. 結言

本研究は、小径高速飛翔体がコンクリート板に斜め衝突する場合に生じる局部破壊の評価およびコンクリート前面に粘弾性体を設置することによるコンクリートの局部破壊の低減効果について検討を行ったものである。本研究の成果を要約すると以下のとおりである。

- (1) コンクリート板厚を変化させて衝突実験を行った結果から、ある衝突速度に対して板厚が増すと、局部破壊は貫通から表面破壊へと軽微になる。また、板厚が一定でも衝突速度が大きくなると、表面破壊→裏面剥離→貫通と局部破壊が増大する。
- (2) 柔飛翔体が数 100m/s を超える速度でコンクリート板に衝突する場合、コンクリートに生じる局部破壊は飛翔体の衝突速度が破壊の主要因となる。
- (3) 飛翔体がコンクリート板に角度 θ ・速度 V で斜め衝突する場合の表面破壊深さは、既往の垂直衝突の表面破壊深さ評価式（修正 NDRC 式）に法線方向の速度成分 $V \sin \theta$ を用いることにより算定できる。
- (4) 既往の局部破壊評価式である修正 NDRC 式に、飛翔体の剛さを表す修正係数（本研究では、柔係数と定義）を乗じることにより、コンクリート板の表面破壊深さが良好に算定できる。
- (5) 粘弾性体を用いることにより、小径高速飛翔体の運動エネルギーを減衰させることが可能である。なお、エネルギー減衰効果は、粘弾性体を貫通する際の飛翔体の回転運動と粘弾性材料による貫通抵抗の相乗効果によるものと考えられる。
- (6) 粘弾性体（物性Ⅰ：3cm 厚、物性Ⅱ：5cm 厚）をコンクリート板前面に設置することにより、とくに Type-B 飛翔体の斜め衝突に対してコンクリートの表面破壊を減少させる効果が認められる。また、衝突角度 15° の場合には、いずれの飛翔体とも粘弾性体中を貫通するだけでコンクリート板に衝突しない（すなわち、損傷・破壊が生じない）。

本研究で得られた成果を実用化するためには、さらに飛翔体の先端形状や材料および粘弾性体の種類や熱特性がエネルギー減衰効果に与える影響を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：構造工学シリーズ 6 構造物の衝撃挙動と設計法, 1993.12.
- 2) Thomas L. Warren, Stephen J. Hanchak and Kevin L. Poormon : Penetration of limestone targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles, International Journal of Impact Engineering, Vol30, Issue10, pp.1307-1331, 2004.11.
- 3) X.W.Chen, S. C. Fan and Q. M. Li : Oblique and normal perforation of concrete targets by a rigid projectile, International Journal of Impact Engineering, Vol30, pp.617-637, 2004.
- 4) Chantal G. Lamontagne, Gerald N. Manuelpokkai, Justin H. Kerr, Emma A. Taylor, Roderick C. Tennyson and Mark J. Burchell : Projectile density, impact angle and energy effects on hypervelocity impact damage to carbon fibre/peek composite, International Journal of Impact Engineering, Vol26, Issue1-10, pp.381-398, 2001.12.
- 5) T. L.Warren, A. F. Fossum and D. J. Frew : Penetration into low-strength (23MPa) concrete: target characterization and simulations, International Journal of Impact Engineering, Vol30, pp.477-503, 2004.
- 6) 小暮幹太, 大野友則, 河西良幸, 坪田張二, 内田 孝 : 鋼板で補強された RC 板の耐衝撃性と補強鋼板の等価コンクリート厚の推定, 構造工学論文集, Vol39A, pp.1599-1608, 1993.3.
- 7) 北川 真, 大野友則, 内田 孝, 井元勝慶 : 高速飛来物の衝突を受ける 2 重 RC 板の局部損傷と耐衝撃性, 構造工学論文集, Vol39A, pp.1609-1619, 1993.3.
- 8) 岡本貢一, 大野友則, 上林厚志, 上田眞稔, 石川信隆 : 小型飛翔体の高速衝突に対する 2 層構造 RC 板の衝撃挙動と局部損傷の推定, 構造工学論文集, Vol40A, pp.1567-1580, 1994.3.
- 9) 伊藤千浩, 白井孝治, 大沼博志 : 剛飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の設計評価式, 土木学会論文集, No507/I-30, pp.201-208, 1995.1.
- 10) R. P. Kenned : A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, Nuclear Engineering and Design 37, pp.183-203, 1976.

(2004 年 9 月 17 日受付)