

## 粘弾性体による小径高速飛翔体の運動エネルギー減衰効果

The energy absorption effect of viscoelastic materials against hypervelocity impact of small projectile

田中信行\*, 生駒信康\*\*, 西本安志\*\*\*, 大野友則\*\*\*\*

Nobuyuki TANAKA, Nobuyasu IKOMA, Yasushi NISHIMOTO and Tomonori OHNO

- \* 防衛大学校理工学研究科 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
- \*\* 博(工) シバタ工業(株) 研究開発部 取締役研究開発部長 (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058)
- \*\*\* 博(工) シバタ工業(株) 研究開発部 サブリーダー (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058)
- \*\*\*\* 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード：小径飛翔体, 粘弾性体, エネルギー減衰効果, 高速衝突

(small projectile, viscoelastic material, energy absorption effect, hypervelocity impact)

### 1. はじめに

発破による爆発や火薬などの爆発物製造プラントにおける爆発事故, また, 近年増加しつつあるテロなどによる爆発が発生した場合, 爆風圧による被害だけではなく, 爆破された物体の破片等の高速衝突によるコンクリート構造物の損傷あるいは人身への被害を与えることが考えられる. これらのような小径の飛翔体の衝突によるコンクリート構造物の損傷を防ぐための防護対策としては, 例えば, コンクリートを鋼ライナーで補強して, 裏面剥離, 貫通を防止する方法<sup>1)</sup>. コンクリートを2層構造とし, その間に緩衝材や空隙を設けて裏面剥離, 貫通を防ぐ方法<sup>2)3)</sup>. 高強度コンクリートや繊維補強コンクリートを用いて表面破壊, 裏面剥離を防ぐ方法が検討されている. このようにコンクリート部材を直接補強す

ることは, 局部損傷の防護に極めて有効であるが, 衝突体を過度に破壊することも考えられるため, 飛翔体による衝撃をソフトに緩衝あるいは飛翔体自身を捕捉したい場合には不向きである. そこで, 本研究はコンクリート構造物前面に緩衝材を設置し, 飛来物の運動エネルギーを減衰させる方法に着目し, 粘弾性体を緩衝材として用いて飛翔体の運動エネルギー低減効果について調べたものである.

### 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離れた位置に粘弾性供試体を設置した. 粘弾性体は供試体の4辺を固定して設置した.

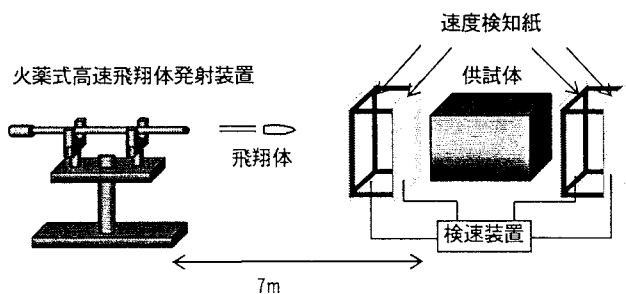


図-1 実験概要図

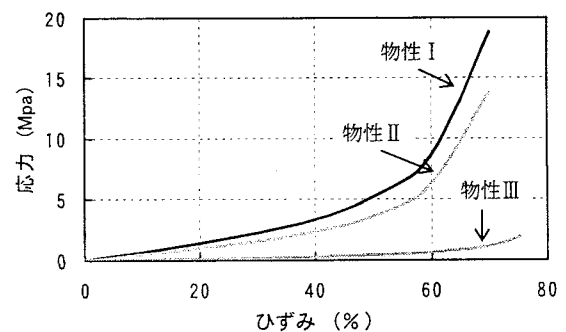


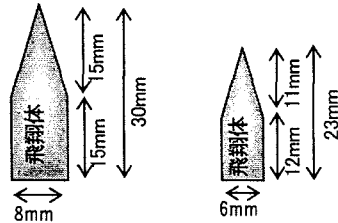
図-2 粘弾性体の圧縮試験結果

表-1 実験ケース(Type-A)

飛翔体種類	Type-A						
衝突速度 (m/s)	700	700	500	700	700	700	700
材料	物性I		物性II		物性III		
温度(°C)	0	20	40	20	0	20	40
粘弾性体厚み (cm)	5.5	5.5	5.5	5.2	5.6	10.3	10.7
	11	11	11	10.4	10.1	15.5	16.2
	16.5	16.5	16.5	15.6	15.7	20	22.1
			22	17.5			

表-2 実験ケース(Type-B)

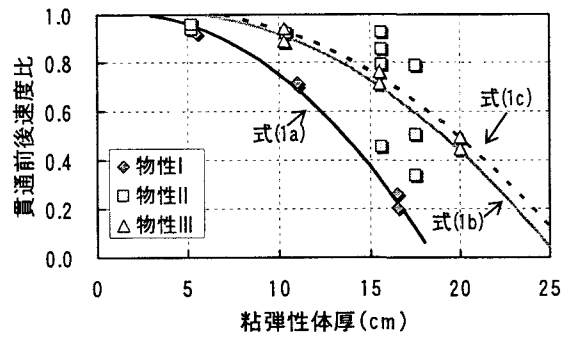
飛翔体種類	Type-B		
衝突速度	920m/s		
材料	物性I	物性II	物性III
温度(°C)	20	20	20
粘弾性体厚み (cm)	5.5	5.5	11
	11	11	16
	13	13	21.5
		14	
		16.5	



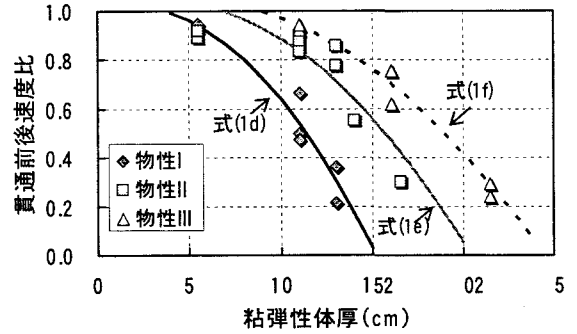
飛翔体 Type-A 飛翔体 Type-B

図-3 飛翔体タイプ

実験パラメータは粘弾性体の種類、供試体の厚み、粘弾性体の温度、飛翔体の種類および飛翔体の速度である。粘弾性体は図-2に示すように、物性I、物性II、物性IIIの3種類の物性のものを用いた。物性Iは硬度65のゴム、物性IIは硬度50のゴムである。また、物性IIIはゴムゲルで、ムーニー粘度70~75のものに添加剤を加え、ムーニー粘度80~85、硬度40としたものである。ちなみに、ゴムゲルとは、固体状でありながら、温度条件などの変化により、流動性をもつ液体の性質を有するゴムである。粘弾性体の寸法はいずれも250mm×250mm×50mmである。実験は厚さ50mmの粘弾性体を単位として複数枚水平方向に積層することにより、供試体厚み $t$ を変化させた。供試体厚み $t$ は5.2~22.1cmとした。粘弾性体の温度は常温20°C、低温0°C、高温40°Cの3種類とした。飛翔体は図-3に示すような、Type-A飛翔体(直径約8mm、長さ約30mm、質量約0.01kg、鉛製、先端は先鋭状)、Type-B飛翔体(直径約6mm、長さ約23mm、質量約0.004kg、鉛製、先端は先鋭状)の2種類を用いた。衝突速度は500~920m/sで変化させた。最大衝突速度はType-Aで700m/s、Type-Bで920m/sである。実験ケースを表-1、表-2に示す。

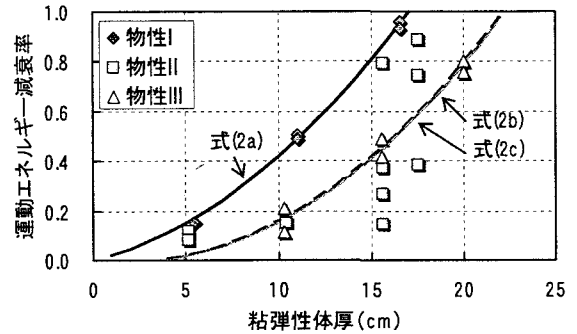


(a) Type-A

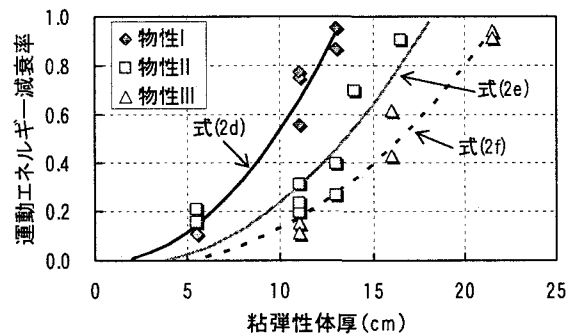


(b) Type-B

図-4 貫通前後速度比と粘弾性体厚みの関係



(a) Type-A



(b) Type-B

図-5 運動エネルギー減衰率と粘弾性体厚みの関係

計測項目は、飛翔体の供試体への衝突前と貫通後の速度である。衝突速度は、速度検知紙を2枚設置し、飛翔体が2枚の速度検知紙間を通過する時間から求めた。また、供試体内部には一定の間隔でゴムシートを設置し、供試体内部における飛翔体の貫通経路を調べている。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 粘弾性体の材料物性の影響

図-4に、飛翔体が粘弾性体へ衝突する速度と貫通後の速度比 ( $=V_r/V_i$ ;  $V_r$ は、貫通後の残留速度,  $V_i$ は衝突前速度) と粘弾性体厚の関係を示す. この速度比が小さい値を示すほど、エネルギー吸収が大きいことを表すものである. また図-5には、運動エネルギー減衰率 ( $=1-E_r/E_i$ ;  $E_r$ は、貫通後の残留運動エネルギー,  $E_i$ は貫通前の運動エネルギー) と粘弾性体厚の関係を示す. ここに、運動エネルギー減衰率 (以降、単にエネルギー減衰率と呼ぶ) は運動エネルギーの低減割合を示し、本研究はエネルギー減衰効果を表す指標として用いている. 図-4 および図-5には、以下に示す回帰式による結果も併せて示している.

##### 1) 速度比と粘弾性体厚の関係

###### a. Type-A+物性 I

$$V_r/V_i = 1 - 0.0034B^2 + 0.0092B \quad (1a)$$

###### b. Type-A+物性 II

$$V_r/V_i = 1 - 0.002B^2 + 0.0118B \quad (1b)$$

###### c. Type-A+物性 III

$$V_r/V_i = 1 + 0.0019B^2 + 0.0126B \quad (1c)$$

###### d. Type-B+物性 I

$$V_r/V_i = 1 - 0.0057B^2 + 0.0208B \quad (1d)$$

###### e. Type-B+物性 II

$$V_r/V_i = 1 - 0.0036B^2 + 0.0246B \quad (1e)$$

###### f. Type-B+物性 III

$$V_r/V_i = 1 - 0.0026B^2 + 0.0229B \quad (1f)$$

##### 2) エネルギー減衰率と粘弾性体厚の関係

###### a. Type-A+物性 I

$$1 - E_r/E_i = 0.0024B^2 + 0.018B \quad (2a)$$

###### b. Type-A+物性 II

$$1 - E_r/E_i = 0.0024B^2 - 0.0085B \quad (2b)$$

###### c. Type-A+物性 III

$$1 - E_r/E_i = 0.0024B^2 - 0.008B \quad (2c)$$

###### d. Type-B+物性 I

$$1 - E_r/E_i = 0.0061B^2 - 0.0075B \quad (2d)$$

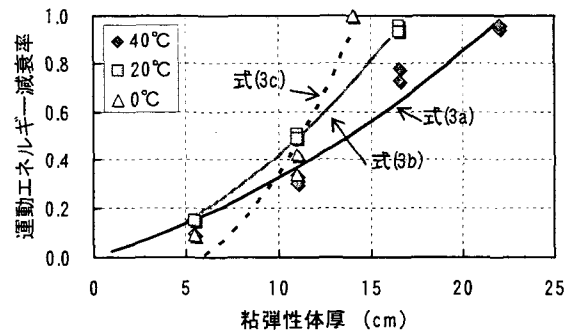
###### e. Type-B+物性 II

$$1 - E_r/E_i = 0.0038B^2 - 0.0143B \quad (2e)$$

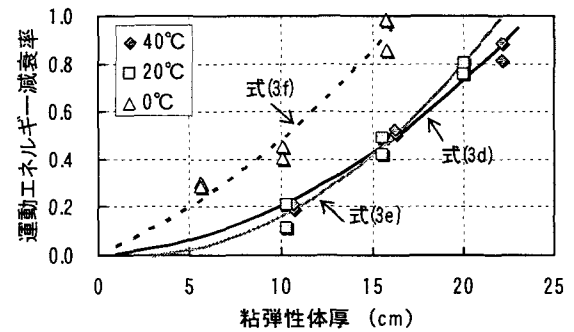
###### f. Type-B+物性 III

$$1 - E_r/E_i = 0.0027B^2 + 0.014B \quad (2f)$$

ここで、 $B$ は粘弾性体厚(cm),  $E_r/E_i=(V_r/V_i)^2$ である.



(a) 物性 I



(b) 物性 III

図-6 粘弾性体温度による運動エネルギー減衰率

図-4 から、粘弾性体厚が増すにしたがって、飛翔体の貫通後の残留速度が減少していくことがわかる. 同様に、粘弾性体厚が増すと、飛翔体のエネルギー減衰率は増加する. 図-4、図-5より、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、速度の減衰効果とエネルギー減衰率は大きいことがわかる. これは、硬度が高くなると粘弾性体は硬くなり、飛翔体への貫通抵抗が大きくなるためと考えられる. また、物性IIIではあまり明瞭でないが、物性IではType-A飛翔体よりType-Bの方がエネルギー減衰率が大きいことがわかる.

#### 3.2 粘弾性体の温度がエネルギー減衰率に及ぼす影響

図-6に、異なる温度状態にある物性Iと物性IIIの粘弾性体中をType-A飛翔体が貫通する場合について、飛翔体の運動エネルギー減衰率と粘弾性体の厚みの関係を示す. 図-6には、以下に示す回帰式による結果も併せて示している

##### 3) 粘弾性体温度に対するエネルギー減衰率

###### a. 物性 I (40°C)

$$1 - E_r/E_i = 0.001B^2 + 0.0225B \quad (3a)$$

###### b. 物性 I (20°C)

$$1 - E_r/E_i = 0.0024B^2 + 0.018B \quad (3b)$$

###### c. 物性 I (0°C)

$$1 - E_r/E_i = 0.0081B^2 - 0.0469B \quad (3c)$$

d. 物性 II (40°C)

$$1 - E_r/E_i = 0.0016B^2 + 0.0045B \quad (3d)$$

e. 物性 II (20°C)

$$1 - E_r/E_i = 0.0024B^2 - 0.008B \quad (3e)$$

f. 物性 II (0°C)

$$1 - E_r/E_i = 0.0018B^2 + 0.0304B \quad (3f)$$

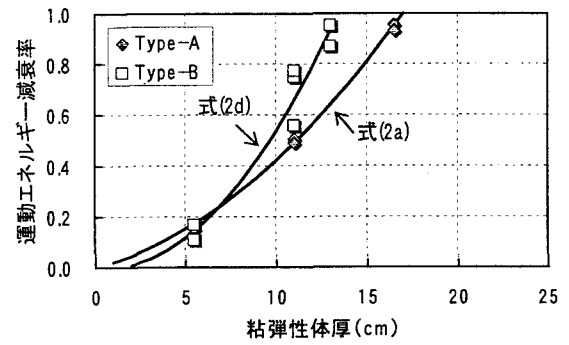
図-6より、粘弾性体の温度によってエネルギー減衰効果に大きな差が生じていることがわかる。すなわち、図-6(a)より、物性 I は温度が低くなるほどエネルギー減衰効果が大きくなることがわかる。これは温度が低くなると一時的に硬度が高くなり、それにより粘弾性体が硬くなったためと考えられる。それに対して、図-6(b)より、物性 III では低温の方がエネルギー減衰効果が大きいという傾向は同じであるが、20°Cと40°Cではエネルギー減衰効果にほとんど差がないことがわかる。一般に粘弾性体の物性は温度依存性を有することが知られているが、今回用いた添加物を加えたゴムゲルでは、高温時の温度依存性があまり見られない。

### 3.3 飛翔体の影響

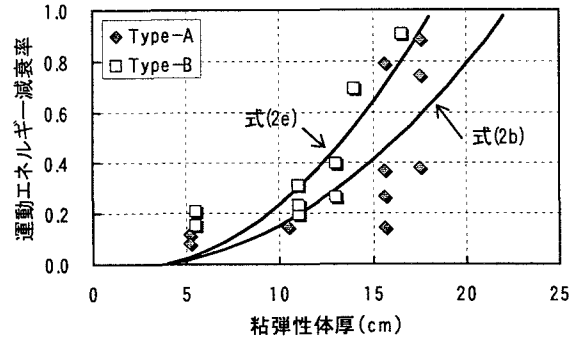
図-7に、Type-AとType-B飛翔体がそれぞれの物性を貫通したときの、飛翔体の運動エネルギー減衰率と粘弾性体の厚みの関係を示す。また、図にはそれぞれの回帰式も重ねて示している。これより、物性 III では飛翔体の諸元が異なってもエネルギー減衰率はほぼ同じであることがわかる。しかしながら物性 I、物性 II では、供試体の厚みが増加するにしたがい Type-B 飛翔体は Type-A よりもエネルギー減衰率が增大していくことがわかる。これは、Type-B 飛翔体は Type-A よりも貫通速度が大きく、貫通中に大きな抵抗力を受けるためと考えられる。

図-8に、Type-A 飛翔体の衝突速度を変化させて物性 I を貫通したときの、エネルギー減衰率と粘弾性体の厚みの関係を示す。衝突速度が 500m/s と 700m/s の場合では運動エネルギーで約 2 倍の差がある。しかしながら、図-8より両ケースには速度の影響がないことがわかる。これより、速度が非常に大きい場合、エネルギー減衰効果は飛翔体の運動エネルギーの大小に関係なくほぼ等しいことがわかる。

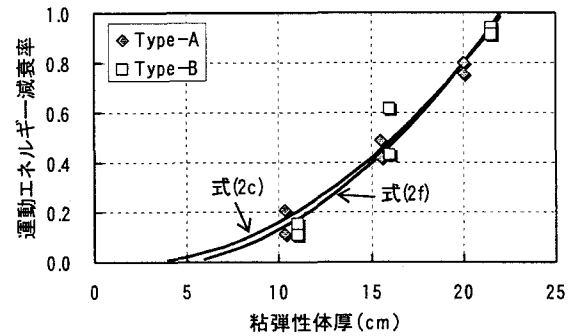
ここで、粘弾性体厚  $B$  をそれぞれの実験ケースの貫通限界厚  $L_p$  (運動エネルギー減衰率が 1.0 になる厚さ) で除して、無次元化したものを粘弾性体無次



(a) 物性 I

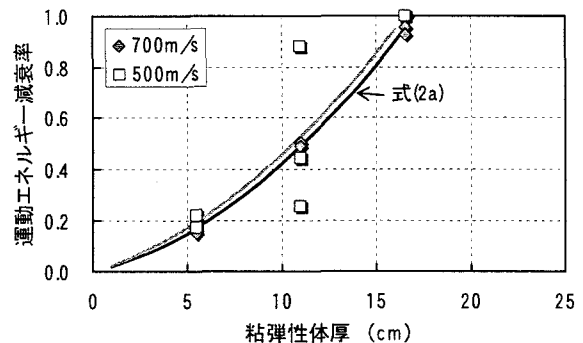


(b) 物性 II



(c) 物性 III

図-7 運動エネルギー減衰率に対する飛翔体の影響



物性 I

図-8 運動エネルギー減衰率に対する衝突速度の影響

元厚 ( $=B/L_p$ ) と定義して、運動エネルギー減衰率との関係を図-9に示す。これより、物性 I ではエネルギー減衰効果にわずかな差が生じているが、どの物性であっても飛翔体の相違による影響はあまりない

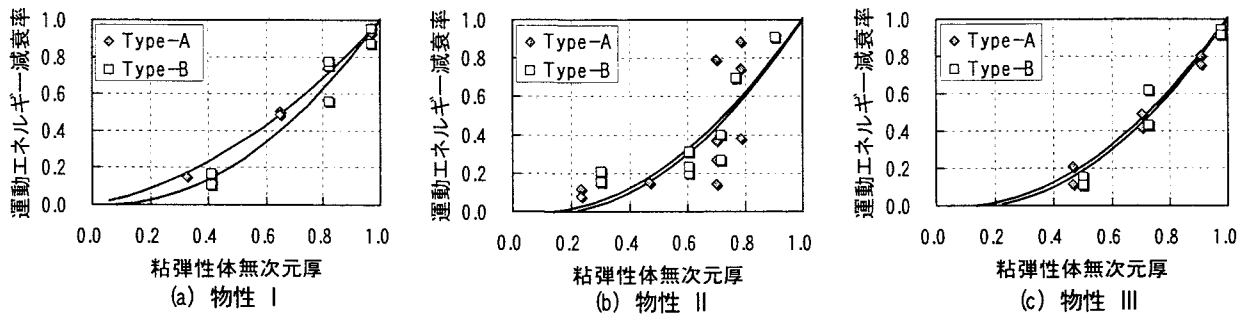


図-9 運動エネルギー減衰率と粘弾性体無次元厚の関係

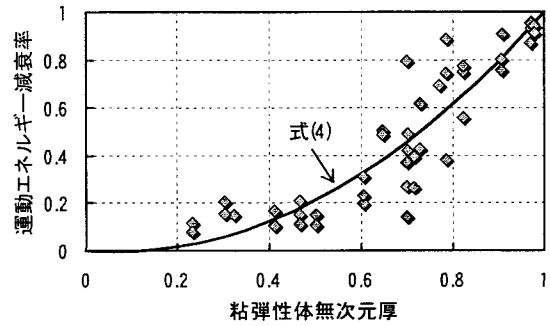
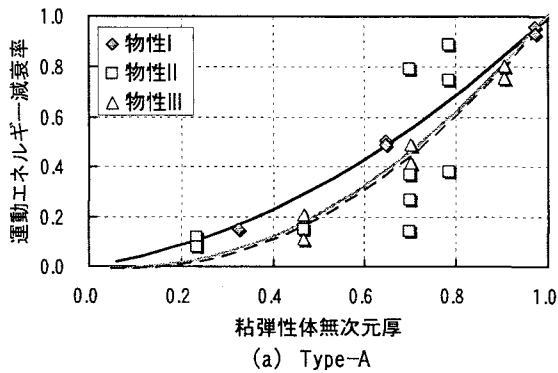


図-11 実験結果と回帰式

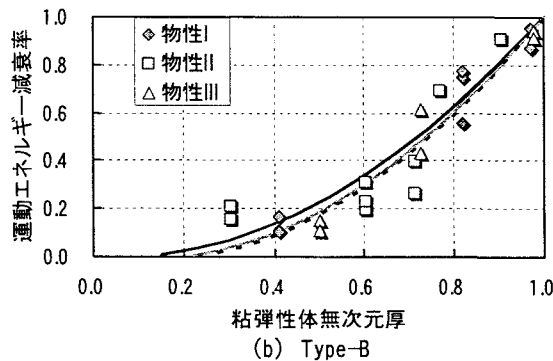


図-10 物性の違いによる運動エネルギーと粘弾性体無次元厚の関係

と考えられる。図-10 に、物性の違いによる運動エネルギー減衰率と粘弾性体無次元厚との関係を示す。これよりも Type-A 飛翔体の物性 I の場合に少しだけエネルギー減衰効果に差がみられるが、物性の影響はあまりないと考えられる。図-11 に粘弾性体無次元厚を用いて表した実験結果と以下に示す実験回帰式(4)を重ねて示す。

$$1 - E_r/E_i = 1 - (V_r/V_i)^2 = 1.1449Lp^2 - 0.1464Lp \quad (4)$$

これより、粘弾性体無次元厚を用いて運動エネルギー減衰効果を表すと、少しばらつきは生じているが物性や飛翔体の影響がなくなることがわかった。

### 3.4 貫通中の飛翔体の回転運動がおよぼす影響

図-12 は、試験に用いた粘弾性体と飛翔体の貫通

状態を示したものである。図-13 に、Type-A 飛翔体が物性Ⅲの粘弾性体中を貫通したときの移動経路を示している。図より、飛翔体が粘弾性体に貫入すると厚さ 10cm 程度から経路に変化が生じていることがわかる。写真-1 に、飛翔体が粘弾性体を貫通した直後の様子を示す。写真-1(b)は、粘弾性体の背面から飛翔体が貫通した瞬間を示している。写真から、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していることを示している。また、写真-1(a)～(d)より、貫通した後も飛翔体は向きを変化させながら回転運動を続けていることがわかる。写真-2 は、衝突位置から 5cm, 10cm の位置に生じた物性Ⅰと物性Ⅲの損傷の様子を拡大表示したものである。写真-2(a)から、飛翔体が粘弾性体貫通時に回転運動することにより切り裂かれたような傷が生じるものと推察できる。また写真-2(b)より、物性Ⅱの場合は 5cm 位置では貫通痕がほとんど残らず、10cm 位置で損傷が生じている。すなわち、物性Ⅰでは厚み 5cm 程度、物性Ⅱ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わかる。これは図-5 に示したように、物性Ⅰは厚み 5cm 程度、物性Ⅲ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。以上より、飛翔体の回転運動による抵抗と経路変化によ

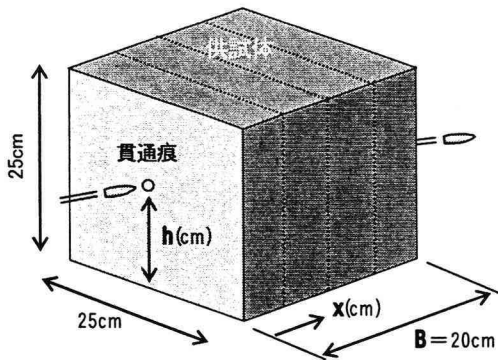


図-12 粘弾性体中を貫通する飛翔体の状況

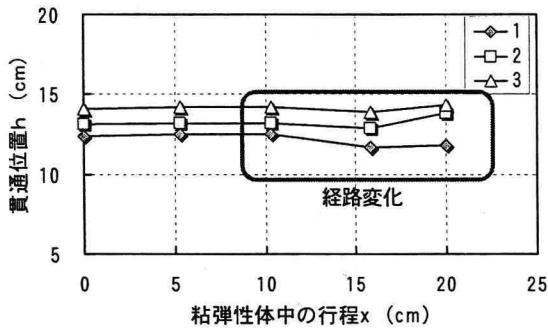


図-13 飛翔体の貫通経路(物性 III)

る抵抗の相乗効果がエネルギー減衰効果となって現れていると考えられる。

#### 4. 結論

本研究は、粘弾性体（硬度 65, 50 のゴムおよび硬度 40 のゴムゲル）を用いて小径高速飛翔体の運動エネルギー減衰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) 粘弾性体の厚みが増すごとに、エネルギー減衰効果が大きくなること、また、粘弾性体の硬度が高くなると厚みが増すごとにエネルギー減衰効果の差が大きくなることわかった。

2) 粘弾性体の温度が低くなるほどエネルギー減衰効果が大きくなることわかった。ただし、今回使用したゴムゲルでは常温から高温では温度依存性が見られない。

3) ゴムゲルを用いると、飛翔体の諸元が異なってもエネルギー減衰率には影響がないことがわかった。なお、物性 I に対して速度を変えた実験を行った結果、衝突速度が変化しても、エネルギー減衰効果にほとんど影響は見られなかった。

4) 小径高速飛翔体が粘弾性体を貫通するとき、粘

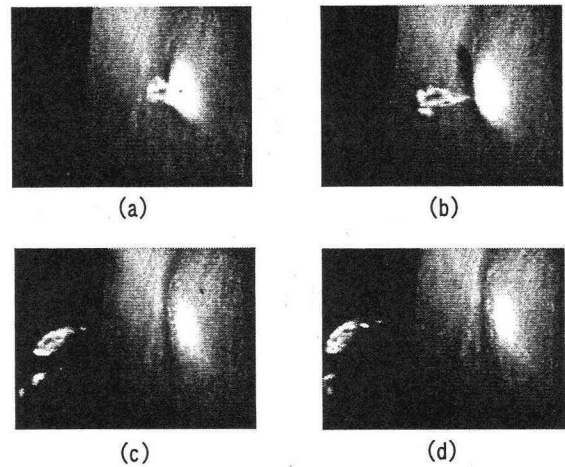
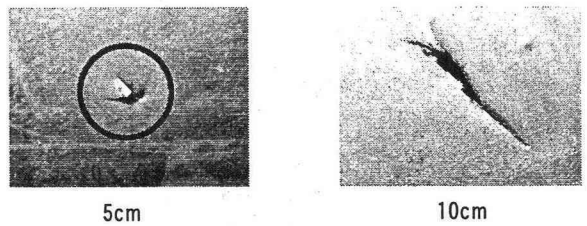
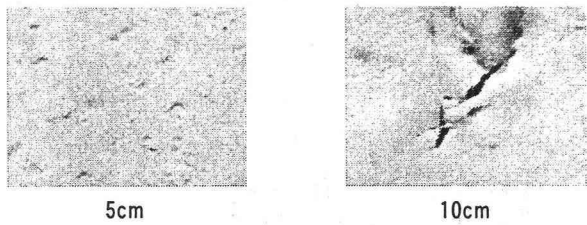


写真-1 貫通時の飛翔体の挙動



(a) 物性 I



(b) 物性 III

写真-2 粘弾性体の損傷状況

弾性体中で回転運動および経路変化を生じ、それによりエネルギー減衰効果が増大している。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 岡本貢一, 大野友則, 上林厚志, 上田真稔, 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.