

高速飛翔体の斜め衝突を受けるコンクリート板の損傷評価

Examine the local damage of concrete plate subjected to hypervelocity oblique impact of small projectile

田中信行*, 大野友則**

Nobuyuki TANAKA 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)

** 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：コンクリート板，小径高速飛翔体，斜め衝突，局部破壊
(concrete plate, small projectile, hypervelocity oblique impact, local damage)

1. はじめに

近年，世界各国様々な地域において，テロによる被害が発生している．テロでは先のスペイン列車爆破事件のように，主に爆弾が用いられることが多い．それらの爆発が発生した場合，音速の10倍以上の速度で衝撃波が伝播するため，爆風圧による被害だけでなく，爆発物の破片や爆破された構造部材・材料の破片が超高速度で周囲に飛散し，衝突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モードは，衝突条件（衝突体および被衝突体の剛性，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ることが知られている．局部破壊は，飛翔体が高速度で衝突する際に，飛翔体の持つ運動エネルギーが衝突部位の破壊によって吸収される現象である¹⁾．高速飛翔体に対する構造物の安全性を検討する場合，構造物の局部破壊を予測・評価する必要があるため，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⁾．国内で行われた既往の研究は，物体が構造物に垂直に衝突するケースを想定した場合が多く，例えば，伊藤ら²⁾の直径98mm，質量70kgの飛翔体を最大48m/sで衝突させて飛翔体の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の破壊モードを推定する算定式の提案．大沼ら³⁾の直径230mm，300mm，質量50～150kgの飛翔体を37～257m/sで鉄筋コンクリートに衝突させ裏面剥離限界厚，貫通限界厚さを評価する算定式の検討などを行った研究がある．一方，海外では現実

により近い状況を想定し，衝突角度の影響を比較検討するため，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^{4)～7)}．超高速度の飛翔体の例として，700m/s～900m/s程度の銃弾，また，爆薬量や爆速に依存するが1000m/s以上にもなる⁸⁾爆発物の破片などがある．しかし，国内の研究では，そのような衝突速度でコンクリートに衝突させる知見は数少ない．そこで，本研究は既往の研究で対象とされている速度よりも高速度（約300～920m/s）で運動する飛翔体を対象として，斜め衝突に対するコンクリートの局部破壊について検討を行っている．まず，コンクリート板厚，高速飛翔体の速度，質量を変化させ，コンクリート板に垂直衝突したときの局部破壊の検討を行った．次に，コンクリート板厚を一定にし，斜め衝突について検討を行った．

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離れた位置に供試体を設置した．コンクリート板の固定方法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．

実験パラメータは，飛翔体の種類，飛翔体の衝突速度，飛翔体の衝突角度，コンクリート板厚とした．飛翔体は図-2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

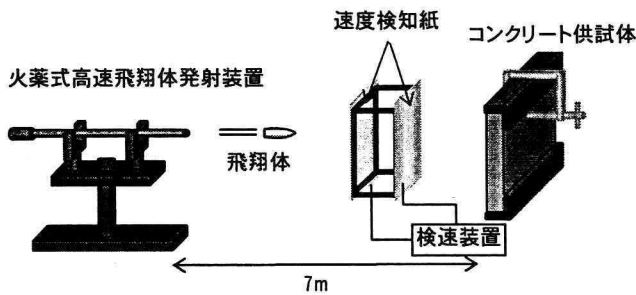


図-1 実験概要図

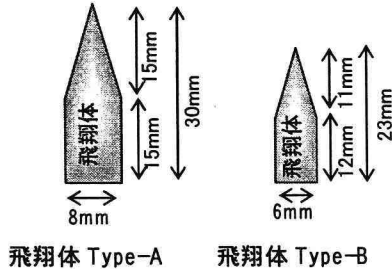


図-2 飛翔体タイプ

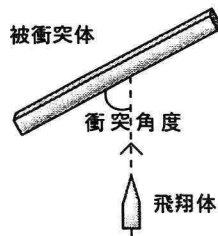


図-3 衝突角度

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。飛翔体の先端形状について, 伊藤ら²⁾の実験 (直径 98mm, 衝突速度最大 50m/s) によれば, 速度が大きくなると先端形状の影響は顕著ではないことが報告されている。本実験における飛翔体の衝突速度は 300~900m/s で, 最大衝突速度は Type-A で 700m/s, Type-B で 920m/s である。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線のなす角 θ として定義し, 10° ~ 90° の間で実験を行っている。本実験で用いた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。コンクリート板供試体は圧縮強度 28.5N/mm^2 , 寸法 $500\text{mm}\times 350\text{mm}\times t$ (板厚) のコンクリート板で, 板の厚み t は 30, 50, 70, 100mm の 4 種類とした。実験ケースを表-2 に示す。

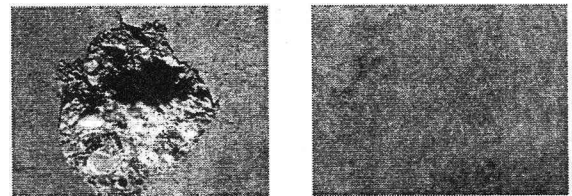
計測項目は, 飛翔体の衝突速度, コンクリート板表面の損傷深さである。衝突速度は, 速度検知紙を 2 枚設置し, 飛翔体が 2 枚の速度検知紙間を通過する時間から求めた。コンクリート板の損傷深さについてはノギスを使用して計測した。

表-1 コンクリート配合

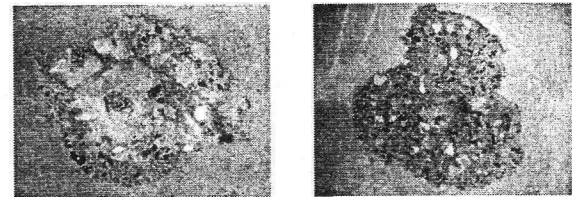
粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材	粗骨材	混和剤
20	15	49	44.7	167	341	793	1011	3.41

表-2 コンクリート板に対する実験ケース

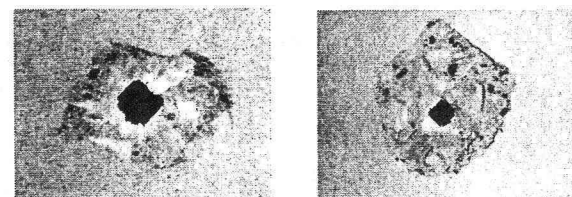
飛翔体種類	衝突角度 ($^{\circ}$)	衝突速度 (m/s)	コンクリート厚み (cm)
Type-A	10, 15, 20, 25, 30, 45, 60	700	3
		300	3, 5, 7
	90	500	
		700	
Type-B	10, 15, 20, 25, 30, 45, 60	920	7
		400	3, 5, 7, 10
	90	700	
		920	



(a) 表面破壊 (板厚 7cm)



(b) 裏面剥離 (板厚 5cm)



(c) 貫通 (板厚 3cm)

写真-1 コンクリート板の破壊状況
(Type-B, 720m/s)

3. 斜め衝突を受けるコンクリート板の局部破壊

最大 700~900m/s の高速度衝突を受けるコンクリート板の局部的な破壊挙動を調べるため, まず垂直衝突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として, 斜め衝突に対するコン

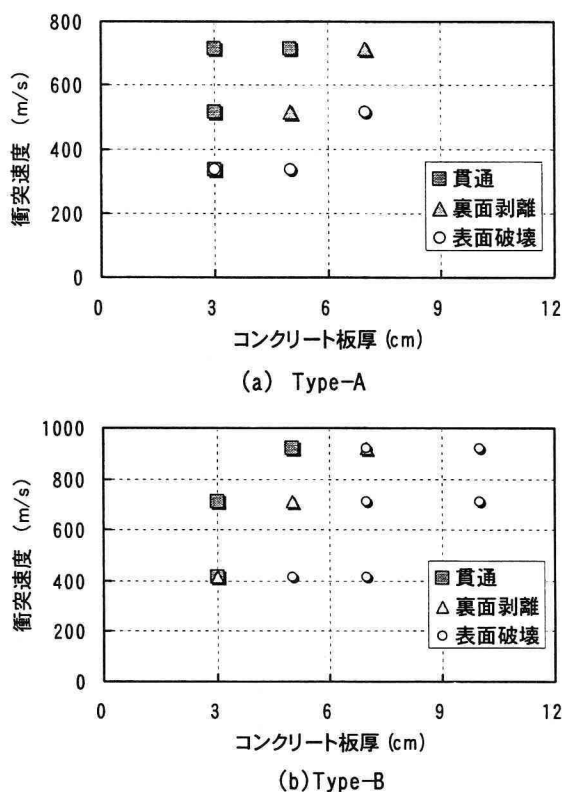


図-4 コンクリート板の破壊状況と厚みの関係

クリート板の破壊状況や損傷評価法について検討を行っている。

3.1 破壊状況

写真-1 は、Type-B 飛翔体、衝突速度 720m/s のときのコンクリート板の破壊状況を示している。写真より、裏面剥離が生じる場合（写真-1(b)）と表面破壊だけの場合（写真-1(a)）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。コンクリート板の局部破壊状況は写真-1 に示すように、板厚の大きさによって表面破壊、裏面剥離、貫通の3種類が生じる。図-4 に、コンクリート板の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-4(a)の Type-A では、衝突速度が 715m/s のとき、板厚 5cm と 7cm の間にコンクリート板の貫通限界厚があることがわかる。衝突速度が 515m/s のときは 3cm と 5cm の間に貫通限界厚、5cm と 7cm の間に裏面剥離限界厚があることがわかる。図-4(b)の Type-B 飛翔体に対する効果も Type-A と同じ傾向を示し、衝突速度が大きくなるほど、（表面破壊→裏面剥離→貫通）と局部破壊が進行していくことがわかる。また、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。

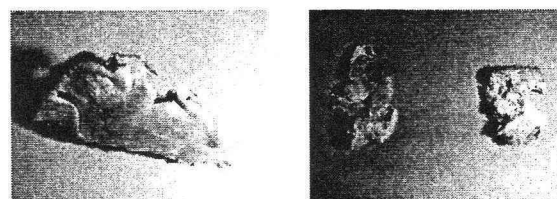


写真-2 飛翔体の破壊の状況

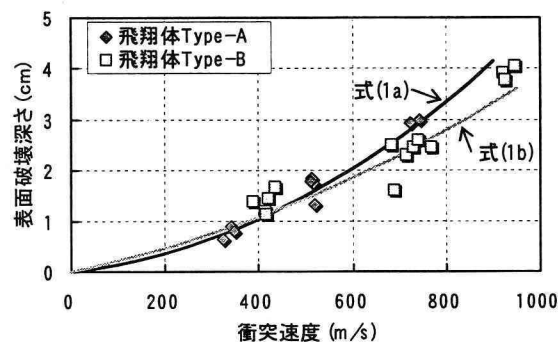


図-5 表面破壊深さと衝突速度の関係(全ケース)

3.2 表面破壊と衝突速度の関係

図-5 に、Type-A、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。図中に示している実験結果に対する回帰式は次式で表される。

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

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

ここで、 x は表面破壊深さ (cm)、 V は衝突速度 (m/s) である。

図より、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大きくなるのがわかる。また、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、一つの式で評価できることがわかる。一般に、試験体に生じる表面破壊深さには運動エネルギーが大きな影響を与えられられるため、Type-B より 2.5 倍大きい運動エネルギーを持つ Type-A の方が大きな破壊が生じることが予測される。しかしながら、本実験で用いた飛翔体は 2 種類とも、写真-2 に示すようにコンクリート板衝突時に飛翔体自身に変形・破壊を生じる柔飛翔体であるので、コンクリートの破壊に差が生じなかったと考えられる。ちなみに、300m/s 以上の速度ではいずれの飛翔体も粉碎した。すなわち、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は差が生じな

表-3 表面破壊寸法

衝突角度(°)	縦(cm)	横(cm)	深さ(cm)
15	2.3	4	0.46
30	5.14	5.6	1.43
45	7.7	8.8	2.2
90	10.1	10.1	4.05

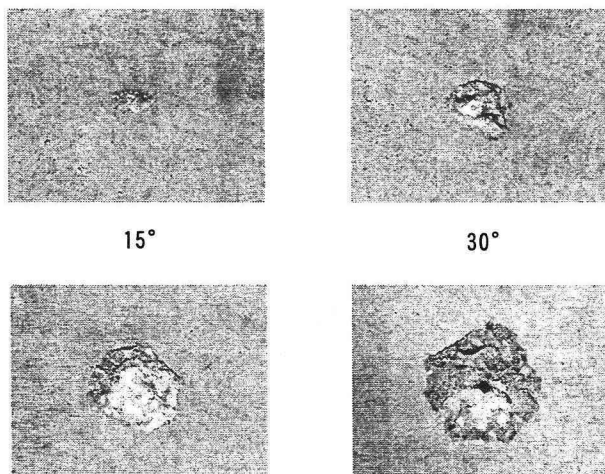


写真-3 斜め、垂直衝突の破壊状況
(Type-B, コンクリート厚 7cm, 900m/s)

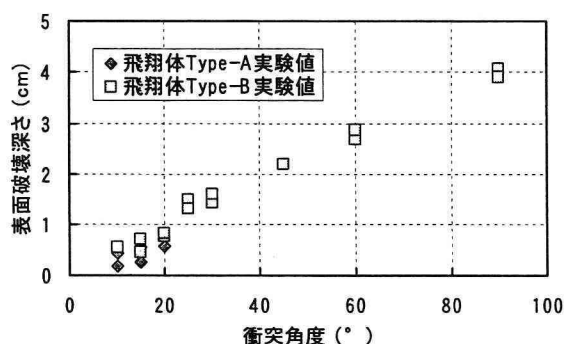


図-6 表面破壊深さと衝突角度の関係

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、コンクリート板（厚 7cm）に対する衝突角度が破壊に与える影響を調べた。図-6 に、表面破壊深さと衝突角度の関係を示す。なお、図中には衝突角度 20° までの Type-A 飛翔体に対する結果を参考までに示している。図から、飛翔体の衝突角度が小さくなるほど表面破壊深さが小さくなることがわかる。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。表-3 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。これより、飛翔体の衝突角度が小さくなると、表面破壊

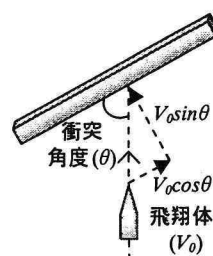
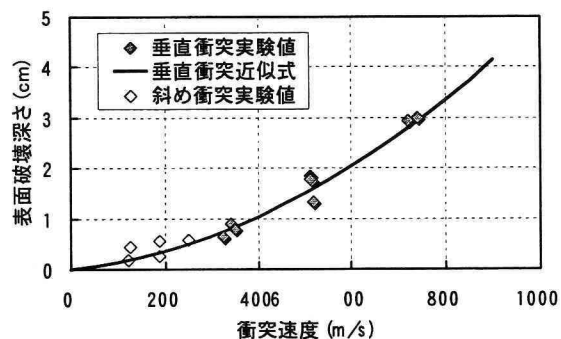
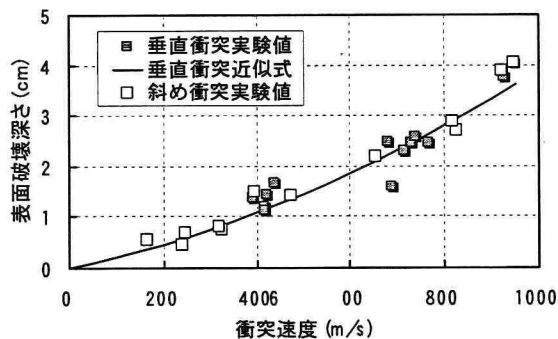


図-7 速度成分



(a) Type-A



(b) Type-B

図-8 表面破壊深さと衝突速度の関係

深さだけでなく破壊面積も小さくなることがわかる。

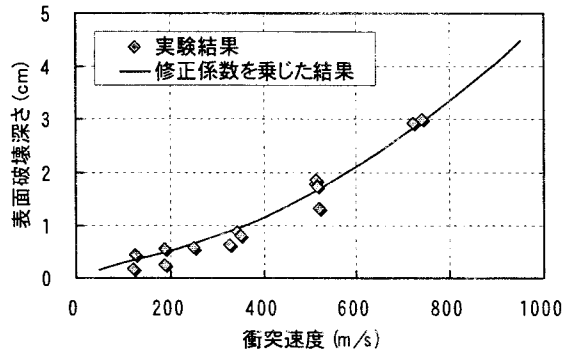
ここで、斜め衝突時のコンクリート板表面に対する法線方向の速度成分 $V_0 \sin \theta$ (図-7 参照) を用いて、前節で行った垂直衝突との比較検討を行う。図-8 に、飛翔体の斜め衝突、垂直衝突全ケースの表面破壊深さと衝突速度の関係を示す。これより、斜め衝突に対する実験結果は、垂直衝突に対する実験式(式(1))による算定結果とほぼ一致していることがわかる。すなわち、飛翔体がコンクリート板に斜め衝突する場合の表面破壊深さは、衝突速度の法線方向成分を入力して求まる垂直衝突の表面破壊深さ評価式を用いて推定できると言える。

3.4 既往の評価式による局部破壊予測

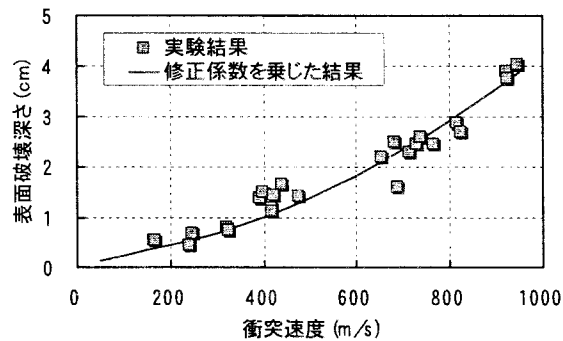
飛翔体がコンクリート板に衝突した時の局部破壊（表面破壊深さ、裏面剥離限界厚、貫通限界厚）を

表-4 修正 NDRC 式に乗じる柔係数

	表面破壊 深さ	裏面剥離 限界厚	貫通限界 厚
Type-A	0.35	0.77	0.59
Type-B	0.43	0.69	0.54



(a) Type-A



(b) Type-B

図-9 修正係数に乗じた修正 NDRC 式と実験結果の比較

評価するために、さまざまな予測式が提案されている¹⁾。その中の代表的な式の一つに修正 NDRC 式⁹⁾がある。本研究の実験条件は、修正 NDRC 式の適応範囲内であるので (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 式を準用してコンクリート板の損傷を評価する。

1) 表面破壊深さ:

$$x = R \cdot \left\{ 3.89946 \cdot 10^{-3} \sqrt{NWD(V_0 \sin \theta / D)^8 / \sqrt{f'_c}} \right\} \quad x \leq 2D$$

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

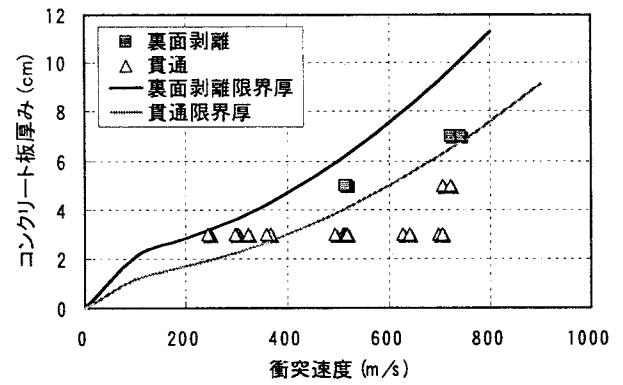
(2a)

2) 裏面剥離限界厚:

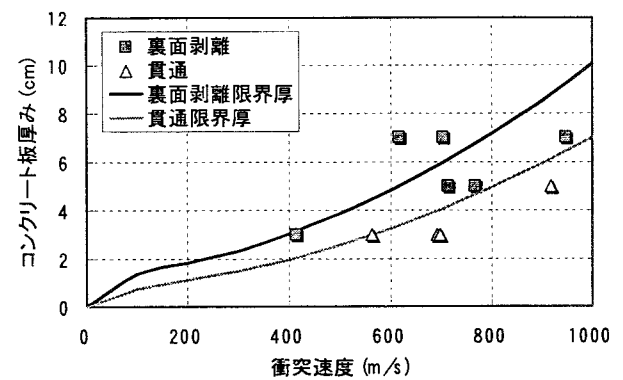
$$s = 2.12D + 1.36x \quad s \geq 0.65D$$

(2b)

3) 貫通限界厚:



(a) Type-A



(b) Type-B

図-10 局部破壊状況と衝突速度の関係

$$e = 1.32D + 1.24x \quad x \geq 1.35D \quad (2c)$$

ここに、 x : 表面破壊深さ (cm), s : 裏面剥離限界厚さ, e : 貫通限界厚さ, 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), θ : 飛翔体の衝突角度 (°), R : 柔係数である。

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; 720m/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 (2) 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。推定値のいずれも、実験値を過大に評価している。すなわち、修正 NDRC 式は衝突しても変形・破壊が生じない飛翔体 (剛飛翔体) を用いた実験に基づいて提案されたものであるため、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。図-8 に示した実験結果に対して修正 NDRC 式を適用させるために必要な柔係数は Type-A, Type-B でそれぞれ、0.35, 0.43 となる。図-9 に、Type-A, Type-B の修正 NDRC 式に柔係数を乗じて得られた算定結果（実線）と実験結果の関係を示す。これから、修正 NDRC 式に適切な修正係数を乗じることで貫入深さが評価できることがわかる。

同様に、裏面剥離限界厚、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-4 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図-10 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. 結論

本研究は、小径高速飛翔体の斜め衝突に対するコンクリート板の局部破壊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、板厚が一定でも衝突速度が大きくなると、局部破壊状態が表面破壊→裏面剥離→貫通と増大する。一方、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。

（2）飛翔体の衝突速度が数 100m/s を超えると質量が破壊に与える影響は小さくなり、衝突速度が支配的要因となることがわかった。

（3）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、法線方向の速度成分から求まる垂直衝突の表面破壊深さから評価できることがわかった。

（4）既往の局部破壊評価式による算定結果と本実験結果を比較した。その結果、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、コンクリート板の局部破

壊が算定できることが認められた。

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) 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，No.507/ I -30,pp.201-208,1995.1.
- 3) 大沼博志，伊藤千浩，白井孝治：剛・柔飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の局部損傷評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.3, 1998.
- 4) 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.
- 5) X.W.Chen, S.C.Fan, Q.M.Li : Oblique and normal perforation of concrete targets by a rigid projectile, International Journal of Impact Engineering, Vol30, pp.617-637, 2004.
- 6) 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.
- 7) T.L.Warren , A.F.Fossum , D.J.Frew : Penetration into low-strength (23MPa) concrete :target characterization and simulations, International Journal of Impact Engineering, Vol30, pp.477-503, 2004.
- 8) 中村順，日吉玲子，新井裕之：鋼管の爆発による破片の飛翔速度の測定，日本鑑識科学技術学会第6回学術集会，pp. A29, 2001.
- 9) 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.