

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

IMPACT BEHAVIORS AND PREDICTION FOR LOCAL DAMAGE OF DOUBLE-LAYERED
RC PLATES SUBJECTED TO PROJECTILE IMPACT

岡本 貢一* 大野 友則** 上林 厚志*** 上田 眞稔**** 石川 信隆*****

By Koichi OKAMOTO, Tomonori OHNO, Atsushi KAMBAYASHI, Masatoshi UEDA
and Nobutaka ISHIKAWA

Of the many measures available for withstanding impact loads, the use of a double-layered RC slab with absorber is expected to have the higher resistance in reducing or preventing local damage. This paper presents the results of an experimental investigation on the impact resistance of double-layered RC plates subjected to the impact of projectile. In the experiment, the effects of two parameters; the combinations of two RC plates having different thicknesses and the existence of an absorber in the middle layer, are mainly investigated. And, the effects of the concrete thickness (7, 9 and 11cm) and the concrete strength and/or type (a normal-:35MPa, a lightweight-:40MPa and a high-strength-:57MPa) of target were also examined. RC plates, 0.6m-square, were used for test specimens. The projectile has a mass of 0.43kg, made of steel with a flat nose. An average projectile velocity was about 170m/sec. A rubber plate shaped into a square with the same size of RC plate was used for a double-layered specimen as an absorber that was put between two RC plates.

Key Words: projectile impact, local damage, double-layered RC plate, impact resistance

1. まえがき

飛来物が構造物に高速で衝突した場合に生ずる破壊の大きさは、衝突体（飛来物）および被衝突体（構造物）それぞれが有する諸特性の相互関係に依存する。また、衝突直後の応力波による影響も無視できないことが知られている。したがって、提案された従来の評価式^{1)~7)}を用いて鉄筋コンクリート板部材に生ずる局部損傷の大きさを推定するには、そのままでは適用できない場合が多い。また、部材の耐衝撃性を向上させることを目的とした研究も行われているが^{8)~10)}、その効果を定量的に評価するまでには至っていない。

衝撃力を受けるコンクリート部材の代表的破壊形式には、表面破壊、貫入、貫通および裏面剥離がある。裏面剥離は、衝突面と反対側の面のコンクリート片が飛散する現象であり、応力波の反射によって発生する引張応力が原因と考えられている。すなわち、発生した引張応力波が材料の引張強度を越えたとき、破壊が生じて材料の一部が飛散する。貫通は、飛翔体が物体（コンクリート部材）の内部を完全に通り抜ける現象をいい、飛翔体が有している運動エネルギーが物体の材料のせん断抵抗力による消散エネルギーより大きい場合に起きると考えられてい

-
- | | | |
|-------|--------------------|--------------------------|
| * | 防衛大学校理工学研究科学生 | (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20) |
| ** | 工博 防衛大学校助教授 土木工学教室 | (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20) |
| *** | 竹中工務店技術研究所 研究員 | (〒270-13 千葉県印旛郡印西町大塚1-5) |
| **** | 竹中工務店技術研究所 主席研究員 | (〒270-13 千葉県印旛郡印西町大塚1-5) |
| ***** | 工博 防衛大学校教授 土木工学教室 | (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20) |

る。せん断抵抗力による消散エネルギーの大小は、材料のせん断強度とせん断面積の大きさによって定まる。貫通が生じない厚さのRC板でも、裏面剥離が生じる場合には剥離した部分の有効断面が減少するため、部分的に貫通限界厚より小さくなり、結果的に貫通が生じる可能性がある。したがって、耐衝撃性を高めるには裏面剥離を抑制することが最も重要である。このためには、応力波の伝播を遮断するかまたは抑制できる構造とする必要がある。本研究で対象としている緩衝材を有する2層構造RC板は、この目的を達成するために考えられたものである。他にも耐衝撃性を向上させる方法としては、衝突面裏側に鋼板のライニングを施す方法⁷⁾・⁸⁾、コンクリート材料として繊維補強コンクリートや高強度コンクリートを用いる方法などが考えられている。しかしながら、これらの合成構造部材を対象とした高速飛来物の衝突実験（衝突速度：約200m/sec）や解析的な研究例は少なく、その衝撃応答特性や耐衝撃性についてはいまだ明らかにされていない。その理由として、高速衝突による衝撃現象が衝突直後に生じる応力波による応答と2次的な弾塑性応答が混在する複雑な応答現象を示すため、実験的研究においては特殊な実験装置や計測機器が必要となること、実験および計測方法自体が難しいことなどが挙げられる。また解析的研究においては、衝撃荷重下の材料構成則や破壊条件を特定することが現段階では困難であることや破壊に至るまでの解析モデルが単純でないことなどから、実現象との整合性が十分でなく定量的な評価を行うまでには至っていない。

著者らは、前述した耐衝撃性補強方法の一つである2枚のRC板を重ね合わせて2層構造とした積層RC部材（はり、板）を対象とした一連の高速衝突実験を行っている⁹⁾・¹⁰⁾。文献10)では、主として2層構造とするRC板の板厚の組み合わせと2層構造の間に挿入する緩衝材の種類（硬質ウレタンフォーム、発泡ゴム）の効果について検討を行った。本研究では、さらに緩衝材として用いた軟質ゴムの有無およびRC板のコンクリート強度や種類の相違が耐衝撃性に及ぼす効果について調べることを目的としている。また、既往の局部損傷評価式を用いて、2層構造RC板の貫通限界厚と裏面剥離限界厚を求める方法について検討している。

2. 実験の概要

2.1 高速衝突実験装置

衝突実験に用いた装置の概要を図-1に示す。本装置は、高速変形負荷装置と飛翔体発射装置から構成されたエアガン方式の高速衝突実験装置である。

飛翔体の発射は、試験開始前にエア・コンプレッサで7気圧に与圧した増圧ジャッキ内の空気を、高速変形負荷装置（負荷50tonf、最大変位150mm、載荷速度4m/sec）を用いて約40msecの時間で約23気圧に増圧することにより行っている。長さ250cmの加速管の始端にトリッキングで固定された飛翔体は、飛翔体の後端部に作用する空気の圧縮力がトリッキングによる拘束力より大きくなった時に射出される。本実験装置では、トリッキングの締め付け力を調整することにより重量約0.5kgの物体を約200m/secの速度で発射することができる。

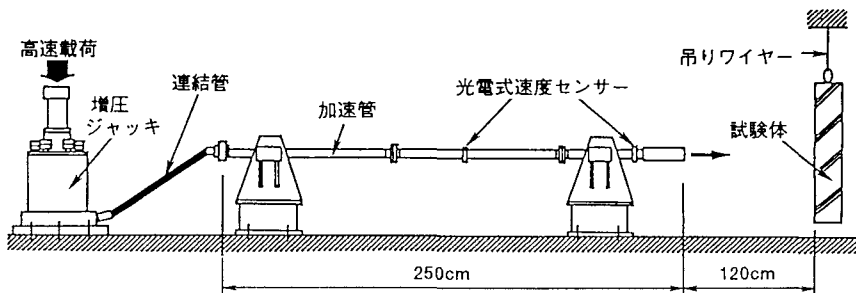


図-1 高速衝突実験装置の概要

2.2 試験体

(1) R C試験体の寸法・諸元

本実験に用いた試験体の寸法・諸元を図-2に示す。試験体は正方形鉄筋コンクリート板で、縦×横:60×60cm、厚さは一体型が7、9および11cm、積層型用のR C板は3、4.5および6cmである。鉄筋の配筋は、一体型はD6の複鉄筋で間隔は7cm（鉄筋比:0.4～0.6%）、積層型用はD6の単鉄筋で間隔は7cmである。積層型用のR C板には、コンクリート打設時に図-2(c)に示す位置4ヶ所に $\phi 10$ mmの塩ビパイプを埋め込んで連結用の穴を作成した。2枚のR C板は、このパイプ穴を利用してM8ボルトで緊結した。試験時における普通、軽量および高強度コンクリートの静的圧縮強度は、それぞれ平均298kgf/cm²、399kgf/cm²、631kgf/cm²であった。

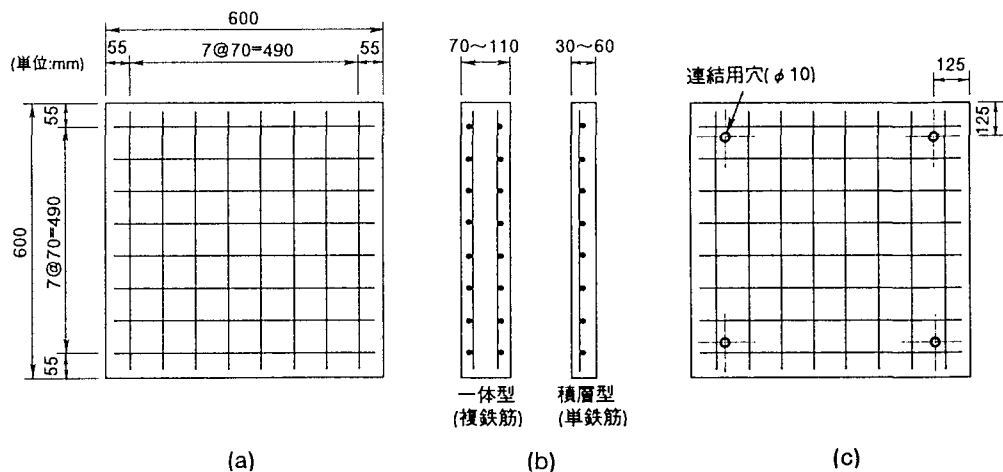


図-2 試験体の寸法・諸元

(2) R C試験体の種類

試験体の種類は、図-3に示すように①板厚の異なる通常のコンクリート板（一体型と呼ぶ、普通コンクリート:平均圧縮強度298kgf/cm²）で厚さ7、9、11cmの3種類、②厚さ9cmの一体型でコンクリート強度および種類が異なる（高強度コンクリート:平均圧縮強度631kgf/cm²、軽量コンクリート:平均圧縮強度399kgf/cm²の2種類）、③薄い2枚のR C板を重ねて一つの試験体とした積層型（等厚型、後壁厚型、後壁薄型の3種類）で、かつ緩衝方法が異なる（重ね合わせ型、空隙型、ゴム板型の3種類）（3×3=9種類）、合計14種類である。積層型は、板厚9cmの一体型と損傷の程度あるいは2層構造による効果を比較・検討する目的から、前後2枚のR C板の板厚の和が9cmとなるように前後の板厚を組み合わせた（3+6cm、4.5+4.5cm、6+3cm）。なお、2枚のコンクリート板の間に間隔（空隙）を設けた積層型は、2枚のR C板の間にナット2個を挿入して間隔を1.5cmに設定し、両側からナットで締め付けた。試験体の一覧を表-1に示す。

(3) 飛翔体

飛翔体は、図-4に示すように頭部、胴体部および尾部の3つから構成されている。頭部は、鋼製で先端形状は平坦である。尾部はプラスチック製で、飛翔体を発射装置の加速管内の一端に配置し、かつ飛翔体に作用する圧力が所定圧に達するまでトリッキングで加速管の入り口部に拘束するためのものである。胴体部は、軟鋼（STK 41:一般構造用鋼管）の鋼管を切削加工した。胴体部の諸元を表-2に示す。表に示すように、胴体部の静的座屈耐力は19.02tonfである。過去に行った同種の実験から、衝突後の飛翔体の胴体部にはほとんど変形がみられなかった。したがって、本実験で用いた鋼飛翔体は剛飛翔体（ハードミサイル）とみなせる。

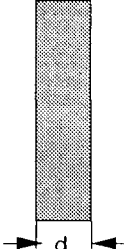
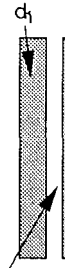
	一 体 型			積 層 型			型の呼び名
				重ね合せ型	空隙型	ゴム板型	
コンクリートの種類	普通	高強度	軽量	普 通			
板 厚	d (cm)			d ₁ + d ₂ (cm)			
	7			4.5+4.5	4.5+4.5	4.5+4.5	等厚型
	9	9	9	3.0+6.0	3.0+6.0	3.0+6.0	後壁厚型
側 面 図	11			6.0+3.0	6.0+3.0	6.0+3.0	後壁薄型
							
				空隙 (1.5cm)	ゴム板 (1.5cm)		

図-3 試験体の種類

(4) 緩衝材の特性

本実験で用いたゴムの力学特性を、図-5に示す。図から、ゴム厚1.5cmでひずみが20%の範囲では弾性係数は約500kgf/cm²であることがわかる。また、厚さ1.5cmのゴム板のばね定数は変位量の大きさで変化するが、約8～40tonf/cmの値をとる。

2.3 実験計測

(1)加速度：図-6に示すように、衝突点中央から7cm(G1:100,000G)、衝突面裏側に中央から5cm(G2:100,000G)、10cm(G3:100,000G)、14cm(G6:10,000G)、15cm(G4:10,000G)、20cm(G5:10,000G)および28cm(G7:500G)の位置に7個の加速度計を配置した。

(2)変位：衝突点から7.5cm(D3)、10cm(D4)、15cm(D2)および20cm(D5)の4ヶ所の位置に渦電流式非接触変位計（応答周波数100kHz）を配置した。また衝突点の変位を測定するため衝突点の裏側(D1)に光学式非接触変位計（応答周波数500kHz）用のターゲットを取り付けた。

(3)鉄筋のひずみは、板中央および中央から14cmの位置で計測した(E1～E4)。

(4)飛翔体の速度：加速管の出口から試験体までの距離Lを、飛翔体が加速管出口を通過する時刻 t_1 （光電式速度センサーにより計測）と試験体に衝突した際の加速度の発生時刻 t_2 の差で除した値（ $V=L/(t_2-t_1)$ ）として算出した。本実験で計測した衝突速度は164～177m/secの範囲にあり、平均約170m/secであった。使用した

表-1 試験体の一覧

No.	試験体名	型 名	コンクリートの種類	緩衝方法の区別	板厚(cm)		試験数
					前	後	
1	T1	一体型	普通		7		2
2	M1	一体型	普通		9		2
3	D1	一体型	普通		11		2
4	M2	一体型	高強度		9		2
5	M3	一体型	軽量		9		2
6	C1E	等厚型	普通	重ね合せ	4.5	4.5	1
7	C1F	後壁厚型	普通	重ね合せ	3	6	1
8	C1B	後壁薄型	普通	重ね合せ	6	3	1
9	C2E	等厚型	普通	空 隙	4.5	4.5	3
10	C2F	後壁厚型	普通	空 隙	3	6	2
11	C2B	後壁薄型	普通	空 隙	6	3	2
12	C3E	等厚型	普通	ゴム板	4.5	4.5	2
13	C3F	後壁厚型	普通	ゴム板	3	6	3
14	C3B	後壁薄型	普通	ゴム板	6	3	3

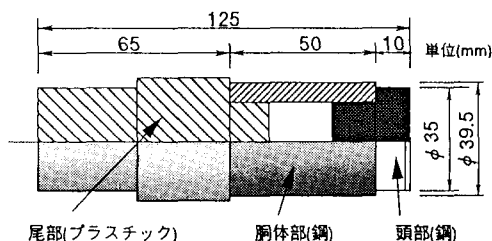


図-4 飛翔体の概要

表-2 飛翔体胴体部の諸元

材 質	長 さ	肉 厚	外 径	座屈強度
軟 鋼	50mm	4.2mm	39.5mm	19.02tonf

計測器の性能を表-3に示す。本実験では、加速管出口に設置した光電式速度センサーによる電気信号（飛翔体がセンサー位置を通過する際に発生する）をデジタライズの計測トリガーとした。データのサンプリング時間間隔は $5\mu\text{sec}$ である。

2.4 試験体の設置

試験体は、図-1に示すように試験体の上部を2本のスリングで吊り、加速管出口から120cmの位置に設置した。飛翔体の衝突に対し試験体は自由に移動可能なので、自由支持条件となる。

3. 実験結果および考察

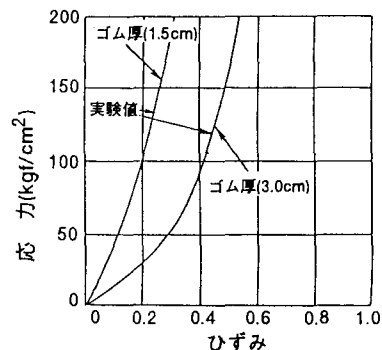
3.1 試験体の損傷状況

(1) 積層方法の相違による損傷の程度

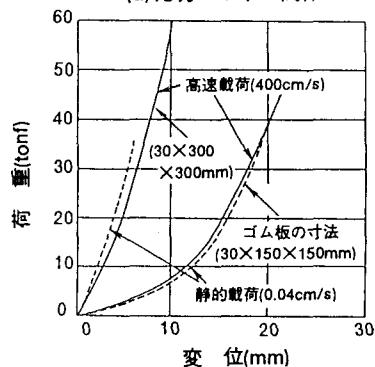
図-7に、2層構造の試験体（板厚合計9cm）の前壁（衝突側）および後壁それぞれの両面に生じた損傷の例を示す。

a. 重ね合わせ型(C1E, C1F, C1B)

前壁の板厚が増加する(3.0→6.0cm)にしたがって、前壁裏面の損傷は貫通から裏面剥離へと軽微になっている。後壁裏面に生じた損傷はいずれも裏面剥離であるが、後壁の板厚が大きくなると、剥離の大きさは直径が25cmから31cmに増大している。この結果から、裏面に生じた損傷の大きさだけで評価すると、後壁薄型の方が



(a) 応力～ひずみ関係



(b) 載荷速度の相違によるゴムの荷重～変位関係

図-5 ゴムの力学特性

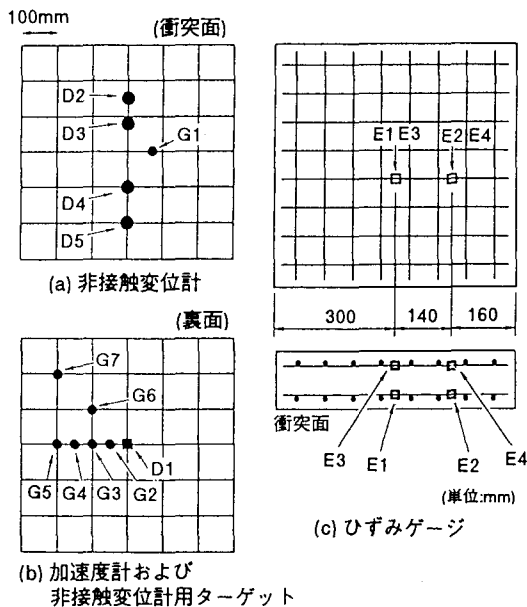


図-6 計測器の配置

やや有利であるといえる。

b. 空隙型(C2E, C2F, C2B)

板厚の相違によらず前壁にはいずれも貫通が生じた。後壁の損傷は、後壁が薄い(3,4.5cm)場合に貫通、厚い(6cm)場合は裏面剥離が生じた。この結果から判断すると、前壁に貫通が生じ、かつ空隙がある場合には後壁が厚い後壁厚型の方が有利であると考えられる。

c. ゴム板型(C3E, C3F, C3B)

前壁が3.0cmおよび4.5cmの場合には前壁に貫通孔が生じたが、後壁の前面にゴム板があるため後壁は裏面剥離限界およびひびわれにとどまった。前壁厚が6.0cmの場合には貫通は生じなかったが後壁が薄いので、後壁裏面にはかなり大きなひびわれが生じた。したがって、後壁厚型の方がやや有利といえる。

d. 等厚型(4.5+4.5cm)で緩衝方法の相違による比較(C1E, C2E, C3E)

前壁と後壁の厚さが等しい等厚型の場合、前壁裏面の状態(コンクリート、空隙、ゴム)の相違によって損傷の程度が裏面剥離、貫通またはひびわれと異なっている。すなわち、空隙型の場合には裏面に何も存在しないので前壁には貫通が生じている。コンクリートが存在する重ね合わせ型では、剥離する部分のコンクリート片の飛散が拘束されるので貫通までには至らなかった。一方、ゴム板の場合も前壁裏面のコンクリート片の剥離・飛散を拘束するが、ゴムが変形するために貫通孔が生じている。後壁裏面の損傷は、重ね合わせとゴム板ではそれぞれ剥離とひびわれであり、ゴム板による緩衝効果が認められる。空隙の場合、何らかの原因で2体の試験体に全く異なった損傷(貫通とひびわれ)が生じたため明確な損傷区分ができず、他のケースと相対的な比較をすることができない。

e. 後壁厚型(6.0cm)で緩衝方法の相違による比較(C1F, C2F, C3F)

前壁は板厚が薄い(3.0cm)ため、すべて貫通した。後壁裏面の損傷を比較すると、重ね合わせと空隙型については裏面剥離が生じたが、ゴム板型ではゴム板の緩衝効果によって裏面剥離が抑制されている。剥離が生じた重ね合わせと空隙型を比較すると、2枚の間に空隙を設けることでその大きさが減少(31→19cm)している。

f. 後壁薄型(3.0cm)で緩衝方法の相違による比較(C1B, C2B, C3B)

前壁の板厚が6.0cmの場合、後壁の板とのかの間の状態の相違によって前壁裏面の損傷が異なっている。すなわち、重ね合わせ型は前壁の裏面の変形がコンクリートで拘束されるためコンクリートが剥離しても飛散するまでには至らない。一方、2枚の板の間に間隙または緩衝材がある(空隙、ゴム)場合には、前壁裏面のコンクリートの変形が拘束されないため、貫通または裏面剥離が生じる。しかしながら、後壁の裏面の損傷は緩衝材の相違によって明らかに差が認められる。最も損傷の程度が小さいのはゴム板を緩衝材として用いた場合であり、貫通および裏面剥離を阻止して剥離限界およびひびわれにとどまっている。

表-4は、本研究で行ったすべての実験結果を示したものである。損傷の程度は、表の左側から貫通、裏面剥離、裏面剥離限界、ひびわれを示している。○および●印は、それぞれ前壁裏面および後壁裏面の損傷を表す。また、○と●に付した数値は、各試験における試験番号を表している。試験体区分のC2E、C3E、C3Bの場合には、同一条件でも損傷の程度が異なる結果が得られた。いずれにしても、本実験ではC3F試験体(後壁厚型で緩衝材を有する)は、前壁は貫通したが後壁は裏面剥離限界あるいはひびわれにとどまった。

表-3 計測器の主要性能

計測項目	計測器名称	性能・諸元	備 考
加速度	加速度トランスデューサー (PCB305A)	圧電素子電圧出力型 測定範囲：最大10万G 固有振動数：60kHz	P C B社製 (東陽テクニカ)
変 位 (衝突面)	渦電流式非接触変位計 (KD2300-12CU)	測定範囲：最大50.8mm 周波数応答：100kHz	Kaman社製 (三協インターナショナル)
変 位 (裏面)	光学式非接触変位計 (7100C)	測定範囲：標準300mm 周波数応答：500kHz	YA-MAN社製

以上の結果から、次のように考察できる。すなわち、一体型と同じ板厚となるように2枚のコンクリート板を組み合わせた2層構造試験体の損傷は、2層化しさらに緩衝材（ゴム板）を設けることにより、一体型試験体（普通コンクリート）の損傷（剥離：25～35cm）より軽微になる傾向が認められる（裏面剥離→裏面剥離限界→ひびわれ）。最も効果があると考えられるのは、2枚目の板厚が1枚目より厚い（後壁厚型）試験体でゴムを緩衝材として用いた積層型である。

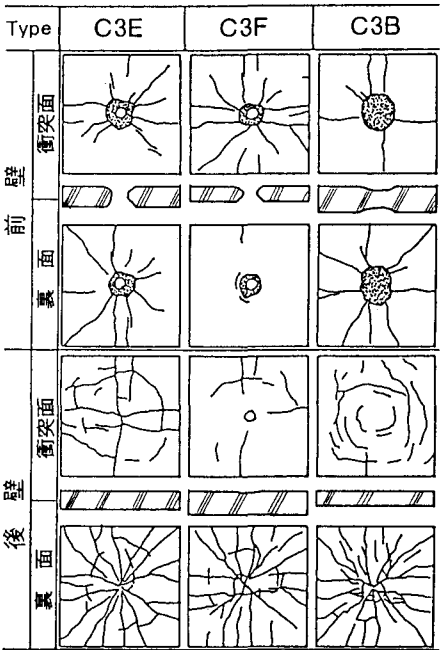
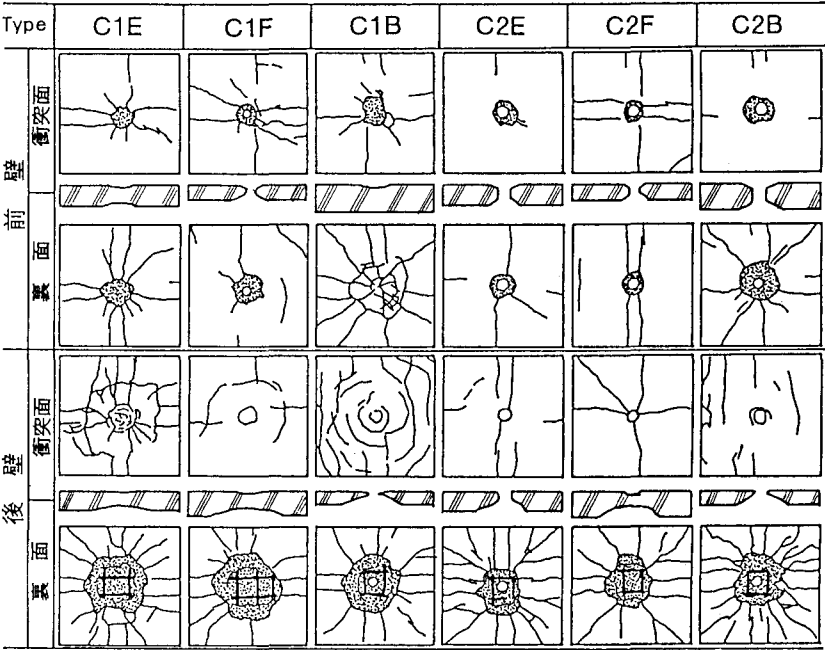


図-7 2層構造試験体の損傷状況

(2) コンクリート強度の相違による損傷の程度

図-8に一体型試験体（板厚9cm）でコンクリート強度および種類の相違による裏面の損傷を示し、比較する。普通コンクリートと軽量コンクリート試験体の裏面破壊径は同程度であるが、軽量コンクリート試験体には①貫通したものがある②同じ裏面剥離の場合でも衝突点に深い貫通孔が生じている、ことを考慮すると普通コンクリート試験体の方が局部損傷に対してやや有利といえる。また、表-4からもわかるように、高強度コンクリートを使用したM2試験体の損傷は、2体とも裏面剥離限界であった。この結果から、高強度コンクリートを使用することにより損傷の抑制に効果があるといえる。

3.2 局部応答の比較・検討

(1) 加速度応答

図-9は、C3E（板厚9cmで、ゴム板を挟んだ等厚型）試験体裏面の加速度の時刻歴（G2～G5）の一例で

表-4 実験結果の一覧

			局部損傷の程度							
			重大 ← → 軽微							
			貫 通	裏 面 剥 離					裏面剥離 限界	ひびわれ
裏面剥離の大きさ										
試験体名	板厚 (cm)		40cm	30	20	10	0			
	前壁	後壁								
C1E	4.5	4.5			●		○			
C1F	3.0	6.0	○		●					
C1B	6.0	3.0			●			○		
C2E	4.5	4.5	○1○2●1					●2		
C2F	3.0	6.0	○1○2			●1	●2			
C2B	6.0	3.0	○1○2●1●2							
C3E	4.5	4.5	○1		●2		○2		●1	
C3F	3.0	6.0	○1○2○3					●1●2	●3	
C3B	6.0	3.0	○3		●2	○1○2		●3	●1	
M1	普通コンクリート			●2	●1					
M2	高強度コンクリート							●1●2		
M3	軽量コンクリート		●2			●1				

注：○は前壁裏面の損傷、●は後壁裏面の損傷、数字は各試験ごとの試験番号

注：○は前壁裏面の損傷、●は後壁裏面の損傷、数字は各試験ごとの試験番号

ある。加速度の継続時間は0.1～0.25msecであることがわかる。また、各計測点における加速度の最大値(図中の○印)が生じる時刻が、衝突点から離れるにしたがって遅れており、衝突点に最も近いG2 (5cm) とG5 (20cm) における最大値発生時刻の差は0.3msecであった。計測された加速度の最大値も、衝突点から15cm離れたG4の位置までに急激に減少している。図-10は、試験体裏面に生じた加速度の最大応答値を衝突点からの距離の関係で示したものである。(a)では2層構造にすることでゴム板型および空隙型のいずれも試験体裏面の中央付近に生じる加速度が一体型に比べて減少する。また、2層構造化の方法の相違による加速度分布を比較すると、(b)～(d)ではいずれも後壁厚型(3+6cm)が最も小さい加速度分布を示し、局部損傷もそれに対応して裏面剥離または裏面剥離限界とひびわれになっている。前後の板厚関係と緩衝方法の相違による比較をすると、(e)後壁薄型(6+3cm)では緩衝方法の相違による加速度分布の差異は顕著ではないが、(f)等厚型(4.5+4.5cm)お

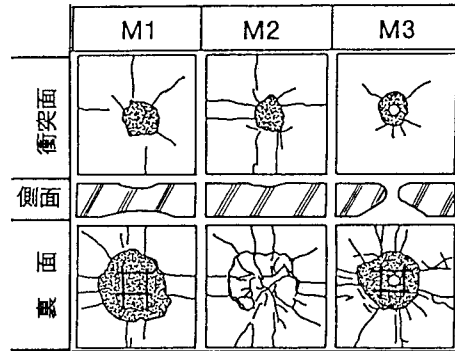


図-8 一体型試験体の損傷状況

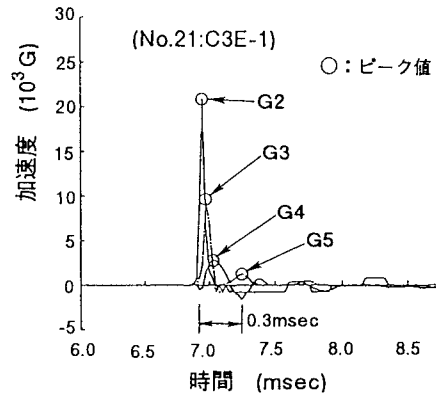
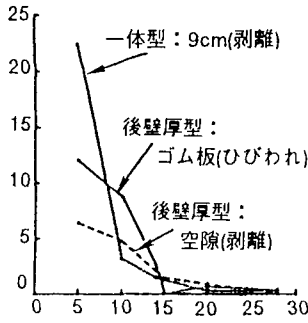
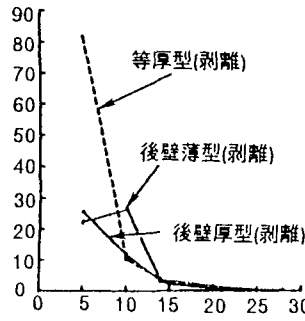


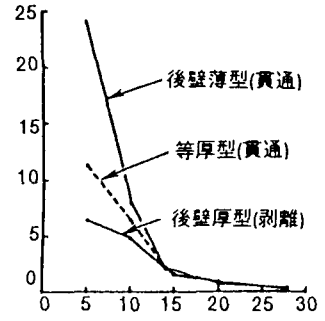
図-9 2層構造試験体の加速度応答の一例



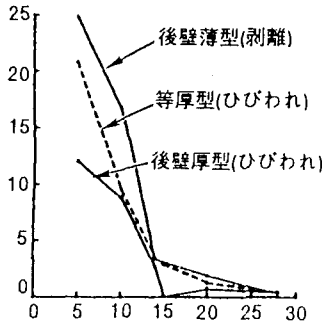
(a) 2層構造化による比較



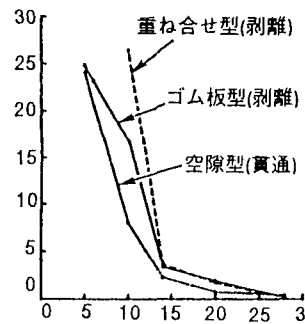
(b) 前後板厚の相違による比較
(重ね合せ型)



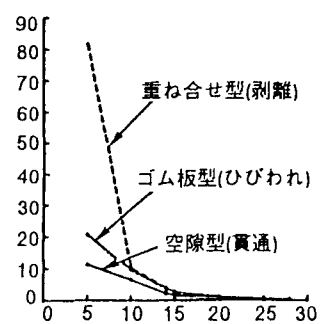
(c) 前後板厚の相違による比較
(空隙型)



(d) 前後板厚の相違による比較
(ゴム板型)

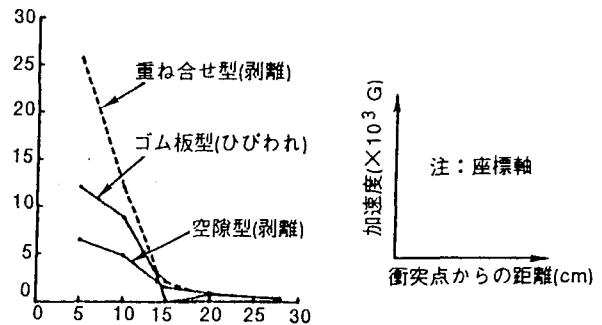


(e) 緩衝方法の相違による比較
(後壁薄型)



(f) 緩衝方法の相違による比較
(等厚型)

よび(g)後壁厚型(3+6cm)では重ね合わせ型より空隙・ゴム板型の加速度応答値が著しく減少している。図-10に示す衝突点を中心とした加速度の不等分布は、衝撃によって試験体内部に生じた応力波が半径約20cm程度の範囲に局部的に集中したことを示すものと考えられる。衝突点から20cmの位置G5での値はG2において計測された値の約1/7~1/20であり、局部応答は衝突点を中心とした半径20cm以内の範囲で生じているとみなせる。



(g) 緩衝方法の相違による比較
(後壁厚型)

図-10 2層構造試験体に生じた
最大加速度値の分布

(2) 鉄筋ひずみ履歴

図-11に鉄筋ひずみの時刻歴応答を示す。各位置におけるひずみの性状は、一体型と積層型の両者はほぼ類似している。すなわち、衝突点直下のひずみ (E1, E3) は上下鉄筋とも衝撃直後引張から圧縮に転じ、衝突点から14cm離れた位置のひずみ (E2, E4) は上下鉄筋とも引張になっている。しかも、E2のひずみは弾性範囲にとどまっており、これらのことは衝突点近傍に局部的に大きな応力が生じたことを示している。

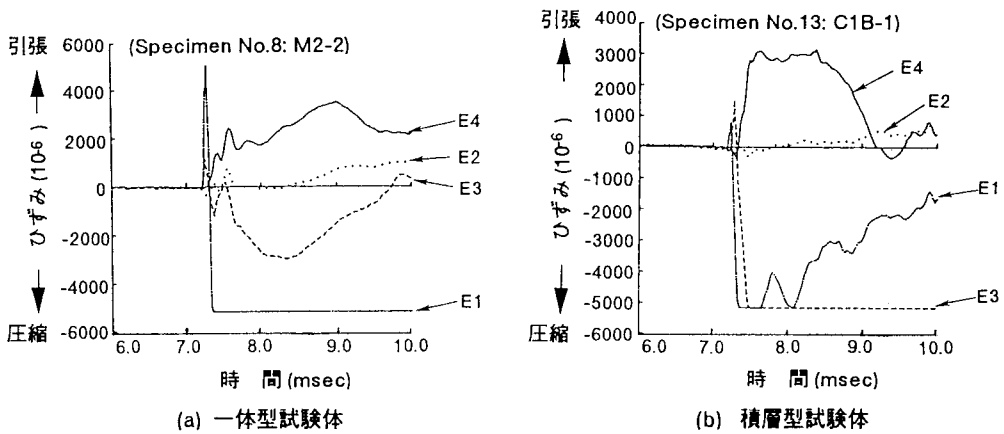


図-11 鉄筋ひずみの時刻歴応答

3.3. 2層構造RC板後壁の裏面剥離限界および貫通限界厚の推定方法

緩衝材を有しない2層構造RC板（壁）部材の局部損傷を既往の局部損傷評価式を準用して算定し、前後壁の厚さの関係による損傷の程度を検討する。2層構造RC板（壁）構造で後壁に損傷を生じるのは、飛翔体が前壁を貫通して後壁に再衝突するか、あるいは裏面剥離によって飛散したコンクリート破片が後壁に衝突する場合である。ここでは前壁を飛翔体が貫通した場合のみを対象とし、飛翔体だけが後壁へ衝突するという前提に立つ。この場合、前壁を通過したときの飛翔体の速度（残留速度）を知らなければならない。なお、緩衝材を有する場合については、緩衝材自体を対象とした局部損傷実験等を行って別途に検討する必要がある。

(1) 後壁に対する飛翔体の衝突速度(残留速度) V_r の推定

従来提案されている局部損傷評価式には、飛翔体の衝突速度の項が含まれている。そこで2層構造RC板（壁）構造部材にその適用を試みる場合は、前壁（第1壁）を通過して後壁（第2壁）に衝突する速度を算定する必要がある。前壁を通過したときの速度を残留速度と定義し、これを後壁に対する衝突速度とみなせば後壁の局部損傷は評価式を再び適用することにより推定できる。従来、残留速度を求めるいくつかの評価式が提案されている。評価式の妥当性を実験により検証した例はほとんどみられないが、提案された既往の評価式の適用条件において本実験の条件を満足する式を選ぶと、修正NDRC式⁶⁾だけが該当する。なお、文献10)では、修正NDRC式とKar式¹⁾を組み合わせることで残留速度を推定し、後壁裏面の貫通・裏面剥離限界厚を評価している。すなわち、残留速度を求める式にエネルギーの消散を考慮したKar式を準用して、求めた残留速度を後壁の衝突速度として修正NDRC式を用いて各限界厚を求めている。しかしながら、Kar式の項に含まれる飛散コンクリートの仮定と実験値との間に相違があることから、結果的に残留速度を過大に評価している。ここでは、修正NDRC式のみを準用するとともに、飛翔体は前壁を通過した後一定の残留速度で飛翔を継続すると仮定して、任意の前壁厚に対する後壁の貫通限界厚（貫通破壊が生じる限界の板厚）および裏面剥離限界厚（コンクリート板にひびわれが生じているが、その部分のコンクリートは飛散しないで残っている状態にある板厚）を推定する。

以下に、各損傷評価式を示す。

貫入深さ評価式⁶⁾

$$\frac{x}{d} = 0.43978 \left(\frac{N d^{0.2} D V^{1.8}}{\sqrt{f'c}} \right)^{0.5} : \frac{x}{d} \leq 2.0 \text{ の場合} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{x}{d} = 0.04835 \frac{N d^{0.2} D V^{1.8}}{\sqrt{f'c}} + 1.0 : \frac{x}{d} \geq 2.0 \text{ の場合} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 x :貫入深さ(cm)、 $f'c$:コンクリート圧縮強度(kgf/cm²)、 N :先端形状係数(平坦:0.72)、 d :飛翔体直径(cm)、 D :飛翔体密度(W/d^3 kgf/cm³)、 W :飛翔体重量(kgf)、 V :飛翔体衝突速度(m/sec)

ここで、式(1)の変数 V を飛翔体がちょうど貫通する速度 V_p に置き換えて、これを求める式に変形すると式(3)が得られる。

貫通に必要な最小限の速度を求める式

$$V_p^{1.8}=5.17046 \left(\frac{x}{d} \right)^2 \frac{\sqrt{f'c}}{N d^{0.2} D} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 V_p :飛翔体がRC板を貫通するのに必要な最小限の速度(m/sec)

なおコンクリート圧縮強度は、設計基準強度(普通、軽量コンクリート:300kgf/cm²、高強度コンクリート:600kgf/cm²)を用いた。式(3)中の変数 (x/d) は、次に示す貫通限界厚評価式[式(4)または(5)]から求める。すなわち、式(4)または(5)の貫通限界厚 e に前壁の板厚(cm)を代入すれば、飛翔体はその板厚をちょうど貫通する場合の (x/d) が求められる。

貫通限界厚評価式⁶⁾

$$\frac{e}{d}=3.19 \left(\frac{x}{d} \right) - 0.718 \left(\frac{x}{d} \right)^2 \quad : \frac{x}{d} \leq 1.35 \text{ の場合} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{e}{d}=1.32+1.24 \left(\frac{x}{d} \right) \quad : 1.35 \leq \frac{x}{d} \leq 13.5 \text{ の場合} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 e :貫通限界厚(cm)

結局、残留速度は以下に示す運動エネルギーのつり合い式から求めることができる。

$$\frac{1}{2} m V_r^2 = \frac{1}{2} m V^2 - \frac{1}{2} m V_p^2 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 m :飛翔体の質量、 V_r :残留速度(m/sec)

ここでは飛翔体が試験体に衝突した直後に生じる表面および裏面のコンクリートの破壊・飛散によるエネルギー消散は考慮していない。以上の式を用い、前壁に対する衝突速度 V を170m/sec(一定)として計算を行えば、表-5に示す結果が得られる。表-5では比較のために、板厚9cmの一体型試験体に対する結果も表示している。計算結果から、衝突速度170m/secで飛翔体が板厚6cmのコンクリート板に衝突して貫通した場合、貫通後の残留速度 V_r は137m/sec(20%の減速)になる。前壁厚が3cmの場合には、残留速度 V_r は164m/sec(4%の減速)である。

表-5 残留速度に対する貫通限界厚および裏面剥離限界厚の推定

コンクリートの種類		普 通				高強度	軽 量
板 厚 (cm)	前 壁	6	4.5	3	0	0	0
	後 壁	3	4.5	6	9	9	9
前壁への衝突速度 V (m/s)		170	170	170	170	170	170
残留速度 V_r (m/s)		137	155	164	170	170	170
貫通限界厚 e (cm)		7.6	8.3	8.6	8.8	7.7	8.8
裏面剥離限界厚 s (cm)		12.2	12.6	12.9	13.0	12.3	13.0

(2) 局部損傷の推定

式(6)から求められる残留速度(すなわち、前壁を貫通した後の飛翔体の速度)を後壁に対する衝突速度とみなして、式(1)または(2)、(4)または(5)および次に示す裏面剥離限界厚評価式[式(7)または(8)]に代入することにより後壁の貫通限界厚および裏面剥離限界厚を推定することができる。

裏面剥離限界厚評価式⁶⁾

$\frac{s}{d}=7.91\left(\frac{x}{d}\right)-5.06\left(\frac{x}{d}\right)^2$: $\frac{x}{d} \leq 0.66$ の場合 (7)

$\frac{s}{d}=2.12+1.36\left(\frac{x}{d}\right)$: $0.66 \leq \frac{x}{d} \leq 11.75$ の場合 (8)

ここに、s:裏面剥離限界厚(cm)

後壁の貫通限界厚は、式(3)から求まるVpを式(1)または(2)中のVに代入して(x/d)を計算し、これを式(4)または(5)に代入することにより求められる。表-5に、積層型試験体の後壁の貫通限界厚および裏面剥離限界厚の計算結果を示す。例えば、前壁厚6cmに対する衝突速度が170m/secであれば残留速度は137m/secで、この残留速度に対する後壁の貫通限界厚は7.6cm、裏面剥離限界厚は12.2cmと推定する。実験においては、前壁厚6cmに対する後壁厚は3cmであるので、後壁はすべて貫通が生じるはずである。実験結果をみれば、貫通が生じたのは6体中2体であった。また、衝突速度が170m/secのとき貫通限界厚は8.8cmであるから、積層型試験体の前壁(3,4.5,6cm)はすべて貫通するはずである。しかしながら、前壁が6cmでは6体中2体、4.5cm

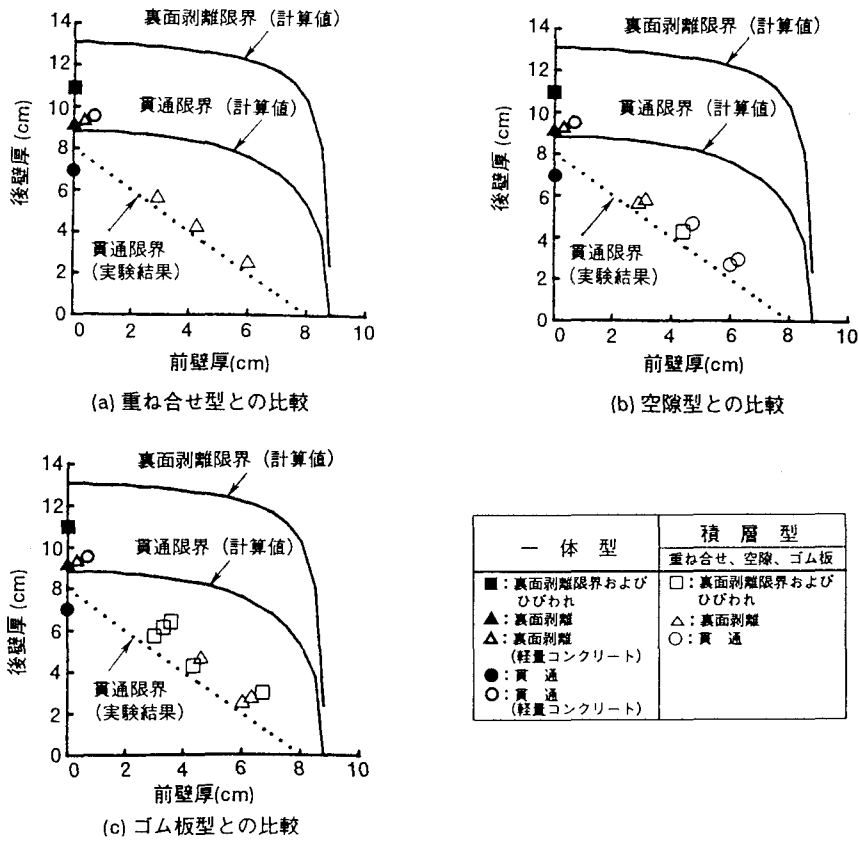


図-12 後壁の貫通・裏面剥離限界厚の推定と実験結果の比較

では5体中2体に貫通が生じなかった。高強度コンクリートの場合、衝突速度が170m/secのとき、貫通限界厚は7.7cm、裏面剥離限界厚は12.3cmである。実験結果では、板厚9cmで剥離限界となり計算値と約3cmの差がある。軽量コンクリートの場合、設計基準強度が普通コンクリートと等しいため、普通コンクリートの場合と等しい推定結果が得

られている。

図-12は、後壁の貫通限界厚および裏面剥離限界厚の推定値と実験結果との比較を示したものである。実験結果は、積層型の後壁裏面の損傷状況を示している。縦軸は後壁厚、横軸は前壁厚である。一体型については前壁厚を0cmとして縦軸上に表示している。実験の結果、一体型試験体では板厚7cmで貫通、板厚9cmで裏面剥離であるから8cm付近が貫通限界厚になると推定できる。修正NDRC式による推定では貫通限界厚が8.8cmとなるので、この場合実験結果と推定値はほぼ一致する。積層型の実験結果に対して貫通限界線を推定すれば、図中の点線で示すようになる。計算による貫通限界厚の推定値と比較すると、積層型[(a)~(c)]のいずれにおいても前壁厚が大きくなるにつれてその差が大きくなっている。図-12に示す推定値と実験結果との対応が不十分な理由は、前壁に衝突した際の局部破壊によるエネルギー消散を考慮していないため残留速度を過大に評価していることが一つの原因と考えられる。

4. あとがき

本研究は、2層構造化した積層RC板の耐衝撃性を検討するために行った実験研究である。小型飛翔体を用いた高速衝突実験により、RC板厚の相違・前後の板厚関係、緩衝材（ゴム）の有無およびコンクリート強度および種類の相違がRC板の局部応答や耐衝撃性に及ぼす影響と効果について調べた。また、得られた結果に基づいて、貫通限界厚および裏面剥離限界厚を推定する方法について検討した。本研究で得られた成果を要約すれば、以下ようになる。

(1)飛翔体の高速衝突に対して、一体型RC板と等しいコンクリート厚さを持つ2層構造RC板は、一体型構造に対して局部応答とくに裏面剥離を抑制できる。また、前後壁2枚の板厚の和が同じであれば、後壁が厚いほど後壁裏面の損傷を抑制できる。

(2)2枚のRC板の間に挿入する緩衝材は、構造物自体の用途や目的に応じて適切な材料を選定する必要がある。すなわち、局部損傷のうち貫入、貫通あるいは裏面剥離のいずれを対象とするかによって用いる材料も異なる。本研究では緩衝材としてゴム板を使用した。本実験で行った飛翔体の高速衝突に対しては、貫通および裏面剥離の抑制に対しその効果が認められた。裏面剥離の防止のために応力波の伝播を遮断する目的からは、2枚のRC板の間を完全に離隔すれば効果が大きいと考えられる。ただし、前壁を貫通しないことが条件となる。衝撃力の緩和と貫通の阻止を目的とする場合は、弾性率の大きい材料を用いることによりその効果が期待できる。

(3)コンクリート強度および種類の相違（普通コンクリート、高強度コンクリート、軽量コンクリート）では、高強度コンクリートが最も局部損傷の抑制に効果的である。軽量コンクリートは、普通コンクリートとほぼ同等の効果であるとみなせる。

(4)加速度分布および鉄筋ひずみの計測結果から、飛翔体の高速衝突に対してRC板は衝突点を中心にした直径30cm（飛翔体径の約8倍）の範囲で局部的に応答することが認められた。

(5)既往の局部損傷評価式を用いて2層構造RC板の後壁裏面の局部損傷（貫通限界厚および裏面剥離限界厚）を推定する場合、既往の式はそのままでは適用できないことがわかった。したがって、飛翔体の衝突の際のコンクリートの飛散等によるエネルギー消費を考慮し、かつ2層構造化による効果を定量的に評価した低減率を導入する等の方法をさらに検討する必要がある。

最後に、本実験を行うにあたり、小暮幹太氏、北川 真氏（研究当時、防衛大学校理工学研究科学生）の援助を得たことを付記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 伊藤、大沼、白井:飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法、電力中央研究所報告(総合報告)、平成3年7月
- 2) Barr, P.:UKAEA;Guidelines for the Design and Assessment of Concrete Structures Subjected to Impact-1987 Edition, 1987.
- 3) Walter,T.A. et.al:Turbine Missile Perforation of Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol.110, No.10, pp.2439-2455, 1984.
- 4) BAM:Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members;Tests on Reinforced Concrete Slabs-Part I, Research Report 119, 1985.
- 5) BAM:Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load;Tests on Reinforced Concrete Slabs-Part II, Research Report 131, 1986.
- 6) Committee on Nuclear Structures and Materials of the Structural Division of the ASCE, Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities, pp.336-338, 1980.
- 7) Barr, P. et.al:Experimental Studies of the Impact Resistance of Steel Faced Concrete Composites, Trans. of Intl. Conf. of SMiRT, Vol.7, No.J, pp.395-402, 1983.
- 8) 小暮、大野、河西、坪田、内田: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、Vol.39A、pp.1599~1608、1993.3.
- 9) 大野、山田、上田、石川、内田:緩衝材を有する2層RCはりの耐衝撃性および多質点系モデルによる衝撃応答解析、構造工学論文集、Vol.38A、pp.1565~1575、1992.3.
- 10) 北川、大野、内田、井元: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、Vol.39A、pp.1609~1619、1993.3.

(1993年9月13日受付)