

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

LOCAL DAMAGE AND IMPACT RESISTANCE OF DOUBLE-LAYERED
RC PLATES SUBJECTED TO PROJECTILE IMPACT

北川 真* 大野友則** 内田 孝*** 井元勝慶****

By Makoto KITAGAWA, Tomonori OHNO, Takashi UCHIDA and Katsuyoshi IMOTO

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 four parameters ;the thickness of RC plates, the existence of absorber, the kind of absorber and the thickness of middle layer are investigated. RC plates are 0.6m-square plates with thicknesses varying from 3cm to 7cm, and a set of two RC plates is used for a test specimen. The projectile has a weight of 0.45kgf, made of steel with a flat nose. An average projectile velocity was about 170m/s. Two kinds of absorber: a soft urethane foam and a sponge rubber, shaped into a square with the same size of RC plate, were used and put between two RC plates, respectively.

1. まえがき

原子力発電関連施設の設計は、一般の設計荷重の他に例えば、航空機の墜落事故や施設内部における事故によって発生するタービンミサイルなどの内外の飛来物の衝突に対しても安全性を十分確保できるように設計する必要がある。¹⁾ 欧州各国および米国においては、航空機落下を想定した原子力発電関連施設の耐衝撃設計が義務づけられている。わが国でも近年、衝撃荷重に対する各種RC構造物の挙動および安全性に関する実験的および解析的研究が行われるようになった。また、RC部材の耐衝撃性を改善するために各種衝撃実験が行われ、RC構造物の衝撃破壊性状を調べるとともに、耐衝撃補強法の提案とその効果などが検討されている。²⁾

一般にRC部材の耐衝撃性を向上させる方策としては、衝突面裏側に鋼板をライニングする方法³⁾、2枚のRC板の間にゴムなどの弾性材料を挟んでサンドイッチ構造とする方法^{4)・5)} および繊維補強コンクリート、高強度コンクリートなどを用いる方法が考えられる。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/s)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

-
- | | |
|-----------------------|--------------------------|
| * 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) |
| *** 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) |
| **** 大林組技術研究所 構造第3研究室 | (〒204 東京都清瀬市下清戸4-640) |

ではまだ明らかにされていない。この理由として、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、実験および計測法自体が難しいことが挙げられる。⁶⁾ また、解析的研究においては衝撃荷重下の材料の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には未だ検討すべき課題が多く残されている。

本研究では、前述した耐衝撃性改善法の一つである2枚のRC板を重ねた2重壁構造RC板（以下、2重RC板と略記）を対象とした高速衝突実験を行い、RC板厚の相違や緩衝材の種類、厚さおよび緩衝材の有無が耐衝撃性に及ぼす効果について実験的に検討することを目的としている。RC部材の耐衝撃性を評価する指標としては、部材の全体応答に対しては耐荷力、終局変形性能およびエネルギー吸収量などが考えられる。一方、局部応答に対しては、貫通や裏面剥離などの局部損傷の程度が考えられる。本研究では、局部応答のみ着目しているのでここでいう耐衝撃性とは局部損傷の抑制能の大きさを表す。コンクリート板に飛来物が高速で衝突すると、衝突面と反対側（裏面）のコンクリートが飛散する現象が生じる。これは裏面剥離と呼ばれ、衝撃による応力波の反射によって発生する引張波が原因であることが知られている。したがって、衝突面から裏面への応力波の伝播を遮断するか、緩衝・吸収すればこの現象を抑制することが可能になると考えられる。本研究で対象とする2重RC板は、衝撃時に発生する応力波の伝播を遮断し、局部損傷のうち主として裏面剥離を抑制させることをねらいとしている。また、耐衝撃設計を行うためには貫通限界厚や裏面剥離限界厚を算定する評価式が必要である。本研究では、既往の局部損傷の評価式を利用して2重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、実験結果と比較している。

2. 実験概要

2.1 試験モデルおよび基本条件の設定

試験体は、航空機衝突の可能性のある鉄筋コンクリート構造物（例えば、原子力発電所建屋⁷⁾）の代表的構造物である壁スラブを単純化したもので、スパンは60×60cmとした。著者らがあらかじめ行った予備実験では、損傷範囲に比べて試験体の寸法が十分大きく、本実験条件下では60×60cmのスパンで十分であるといえる。実際の建屋部材の平均的スパンが7～8mである⁷⁾ことを考慮すると、試験体スパンの縮尺は、実部材の約1/12.5に相当する。また、支持条件は、物体の衝突によって生じる衝撃荷重の大きさを直接計測する技術や計測器が現段階では無く、試験体に生ずる慣性力を衝撃荷重として推定するという目的から自由支持とした。飛来物の衝突速度は、航空機の墜落速度として原子力技術委員会の安全基準(KTA2202)に示されている $V=215\text{m/s}$ を設定目標速度として考えたが、本実験では実験装置の能力上、平均衝突速度約170m/sであった。

2.2 実験装置

本実験装置は、比較的軽量(約0.5kgf)の物体を空気圧を利用して高速で衝突させる装置であり、高速変形負荷装置（最大荷重容量50tonf、最大載荷速度4m/sec）および飛翔体発射装置から構成される。空気圧を衝撃力として得るためには空気圧を極めて短時間に所定圧力まで増圧する必要がある。すなわち、容器内に一定量の空気容積を

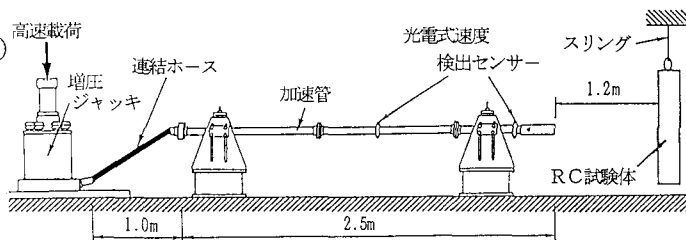


図-1 高速衝突実験装置の概要

短時間に圧縮して急速に減少させなければならない。このため増圧には高速変形荷重装置を用い、増圧ジャッキに取り付けられたピストンを最大速度4m/secで変位させることにより、シリンダー内の空気を高速圧縮（約0.03～0.04secで23気圧に増圧）した。装置の概要を図-1に示す。

2.3 RC試験体および飛翔体

(1) RC試験体

本実験で使用した試験体は、寸法60×60cmの正方形単鉄筋コンクリート板で厚さが3～10cmの9種類(表-1)を2枚組み合わせたものである。基本となるRC板の寸法、配筋を図-2に示す。2重RC板は2枚のRC板の間に何も挟まない空隙型(Type-B)、緩衝材を挟んだ積層型 (Type-C)および比較のための通常のRC板(一体型:Type-A)の3タイプである。2重RC板(Type-B,C)は、図-3および写真-1に示すように2枚のRC板を連結用ボルトで固定した。

表-1 試験体板厚および鉄筋比

RC板厚(mm)	30	40	45	50	60	70	80	90	100
有効せい(mm)	15	25	30	35	45	55	65	75	85
鉄筋比(%)	1.41	0.85	0.71	0.61	0.47	0.39	0.33	0.28	0.25

緩衝材としては、最近、衝撃吸収材として注目されている硬質ウレタンフォーム⁸⁾ (以下、硬質ウレタン)と弾性材料であるゴムを発泡して製造したネオプレンゴムスポンジ(硬度12)の2種類を選定した。緩衝材の厚さは3cmと6cmの2種類とした。それぞれの緩衝材の効果を調べるために緩衝材として硬質ウレタンを用いた実験(実験A)とネオプレンゴムスポンジを用いた実験(実験B)を行っている(表-2)。

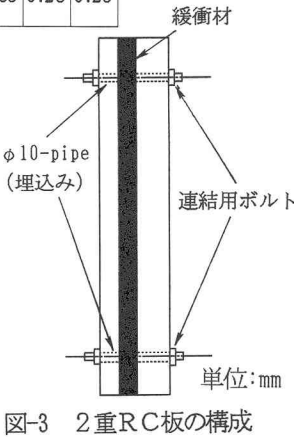


表-2 実験区分および材料強度

実験区分	緩衝材の種類・材料特性		コンクリート強度(kgf/cm ²)		
	種類	材料特性 (静的試験)	载荷速度	圧縮	引張
A	硬質ウレタンフォーム	圧縮強度:約1,40kgf/cm ² (条件:载荷体15×15cm, 試験片(6×15×15cm))	静的	336,3	24,2
			高速(1,0m/s)	454,5	41,4
B	ネオプレンゴムスポンジ	圧縮強度(80%変形時): 約4,42kgf/cm ² (条件:同上)	静的	334,6	31,5
			高速(1,0m/s)	509,6	48,8

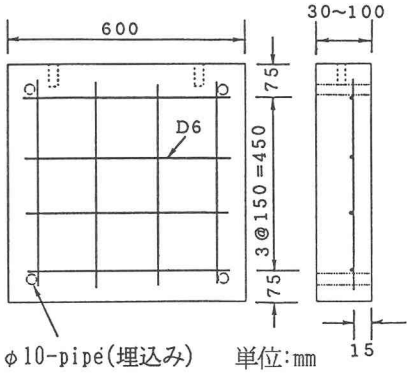


図-2 RC試験体の寸法・配筋

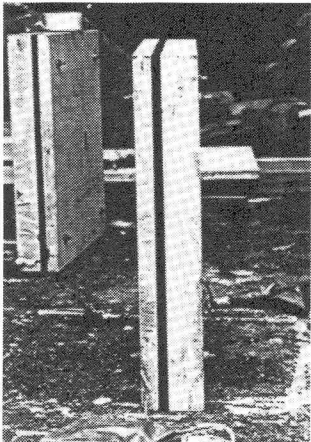


写真-1 2重RC板(Type-C)

また、2重RC板(Type-B,C)の板厚は一体型(Type-A)のRC板厚(8,9および10cm)を基準板厚とし、表-3に示すように前後2枚のRC板の板厚の和が基準板厚に等しくなるように前後のRC板を組み合わせた。

表-3 試験体の種類および板厚の組み合わせ

実験 A														実験 B										
板厚 (mm)	一体型 (Type-A)	空隙型 (Type-B)						積層型 (Type-C)						一体型 (Type-A)	空隙型 (Type-B)				積層型 (Type-C)					
		$d_1=d_2$		$d_1>d_2$		$d_1<d_2$		$d_1=d_2$		$d_1>d_2$		$d_1<d_2$			$d_1=d_2$		$d_1>d_2$		$d_1=d_2$		$d_1>d_2$			
	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2		
	80	40	40	50	30	30	50	40	40	50	30	30	50	80	40	40	—	—	40	40	—	—	40	40
90	45	45	60	30	30	60	45	45	60	30	30	60	—	—	—	50	40	—	—	—	—	50	40	
100	50	50	70	30	30	70	50	50	70	30	30	70	100	50	50	—	—	50	50	60	40	60	40	
側面図	d		d_1		d_2		d_1		d_2		d_1		d_2		d		d_1		d_2		d_1		d_2	

(2) 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(全重量:約0.43kgf)。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ある。本実験では、胴体部に一般構造用炭素鋼鋼管(STK41)を加工して用いた。その座屈耐力は約19tfであった。著者らが過去に同一の飛翔体を用いて行った実験⁹⁾から、この飛翔体は衝突時に胴体部が座屈変形しない剛飛翔体(hard missile)とみなすことができる。

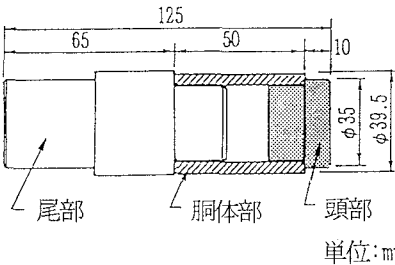


図-4 飛翔体の概要

2.4 実験計測

計測は、試験体に生じる変位、加速度について行った。図-5に示すようにRC試験体の衝突面側4箇所(衝突点から7.5cm(D2,D3),15cm(D1,D4))に渦電流式非接触変位計(周波数応答:100kHz)を、試験体裏面の計7箇所(0cm(G1),5cm(G2),10cm(G3)15cm(G4),20cm(G5),14cm(G6),28cm(G7))に圧電素子型加速度計(固有振動数:60kHz,500~100000G)を設置した。また、試験体裏面中央部に非接触電子光学式変位測定装置(周波数応答:500kHz)用のターゲット(白黒のプレート)を取り付けて変位の

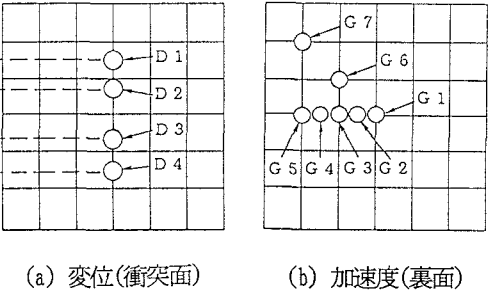


図-5 計測位置

計測を行った（写真-2）。本実験では加速管出口に設置した光電式速度検出センサーによる電気信号をデジタル・メモリーの計測トリガーとした。実験データは、デジタル・メモリー（最小サンプリングタイム $5\mu\text{sec}$ ）にデジタル・データとして取り込み、パーソナル・コンピューターを介してフロッピーディスクに記録した。計測システムを、図-6に示す。

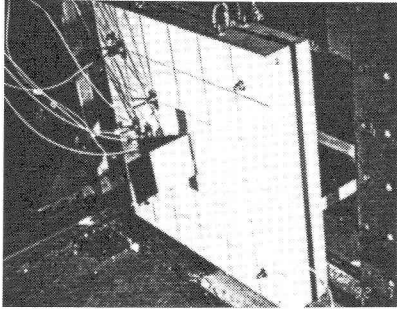


写真-2 試験体裏面の状況

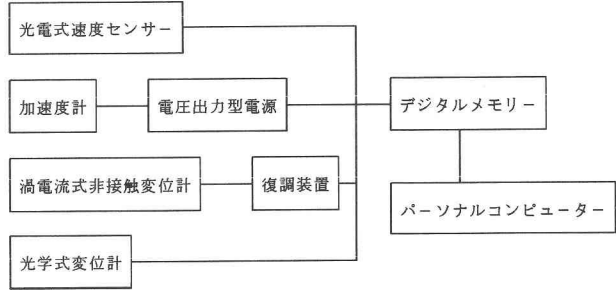


図-6 計測システム

3. 実験結果および考察

3.1 局部損傷

(1) 構造形式の相違による局部損傷の程度の比較（実験A：硬質ウレタン）

実験の結果、基準板厚8cmと9cmの場合は、構造形式によらずすべて貫通した。したがって、本考察では基準板厚10cmの場合について局部損傷の程度を比較する。図-7は、実験Aについて2重RC板と通常のRC板の局部損傷状況を比較したものである。なお、2重RC板の板間隔および緩衝材の厚さは3cmである。図より、一体型(Type-A)の裏面が広い範囲にわたって裏面剥離(損傷径約33cm)を起こしているのに対し、2重RC板(Type-B,C)の後壁(第2壁)裏面の損傷は小さく抑えられている。とくに、前壁が厚い場合(前:7cm,後:3cm)には、空隙型(Type-B)、積層型(Type-C)のいずれの場合も裏面剥離を防止し、放射状ひびわれにとどまっている。すなわち、2重RC板は通常のRC板よりも局部損傷を小さく抑える効果があり、前後の板厚の和が一定の場合には、前壁を厚くした方が裏面剥離を小さく抑える効果大きい。これは、前壁が厚いと飛翔体が前壁を通過するのに多大なエネルギーを消失するので残留速度が減少し、後壁に対する衝撃力が小さくなるためと考えられる。また、前壁が厚い(前:7cm,後:3cm)場合のType-BとCの後壁前面の損傷をみると、大きな円状ひびわれが生じていることがわかる。さらに、前壁裏面の損傷をみると前壁が薄い(前:3cm,後:7cm)場合よりも損傷径がかなり大きくなっている。このことから後壁前面の円状ひびわれは、前壁で飛散したコンクリート塊が飛翔体と一体となった状態で後壁に衝突したために生じたものと考えられる。すなわち、前壁が厚いと後壁は板全体で衝撃力を受けることになり、薄い板厚でも局部的な損傷を抑えることができる。前壁が薄い(前:3cm,後:7cm)場合には、飛翔体が前壁を容易に貫通するために衝突時のエネルギーはあまり消費されず、大きな残留速度で後壁に衝突する。この結果、残留速度を衝突速度とみなしたときの裏面剥離限界厚よりも後壁厚が小さい場合には裏面剥離が生じる。

(2) 衝撃緩衝材の効果（実験A、B）

実験Aでは硬質ウレタンを緩衝材として使用したが、図-7より空隙型(Type-B)と積層型(Type-C)の両者の局部損傷の程度に顕著な差異は認められず、空隙型(Type-B)の方が損傷の程度が軽微であった。また、積層型(Type-C)については、一部緩衝材の厚さを6cmとしてその効果を調べたが、厚さ3cmの場合と比べてほとんど差異は認められなかった。このことから、本実験の条件下での高速衝突に対しては、硬質ウレタン

Type		Type-A	Type-B	Type-C	Type-B	Type-C	Type-B	Type-C
		10cm	7cm(前)+3cm(後)		5cm(前)+5cm(後)		3cm(前)+7cm(後)	
前壁	前							
	後							
後壁	前							
	後							

図-7 局部損傷の程度の比較(実験A, 基準板厚10cm)

に緩衝材としての効果は期待できないといえる。つまり、本実験で使用した硬質ウレタンは飛翔体の高速衝突に対して貫入抵抗力が非常に小さく、飛翔体が容易に貫通できる材質であるために緩衝材としては有効に機能しないものと考えられる。つまり、局部的に集中荷重を受けたとき脆性的に破壊する材料は高速衝突に対しては衝撃力を吸収する効果がほとんどなく、応力波の遮断という目的からはむしろ空隙構造とする方が効果的であるといえる。衝撃力の緩和と貫通防止を緩衝材に期待するとすれば、ゴムのような弾性率(引張、せん断)の大きい材料を選定することが望ましいと考えられる。

実験Bでは、弾性材料であるゴムを発泡させて軽量化したネオプレンゴムスポンジを用い緩衝材としての効果を調べた。図-8に、実験Bの一体型(Type-A)と積層型(Type-C)の損傷結果を示す(図中、●印、▲印および■印)。縦軸がRC板厚、横軸が緩衝材の厚さである。一体型(Type-A)については縦軸上(緩衝材厚0cm)に結果を表示している。また、図中の試験体名は、積層型(Type-C)の前後板厚の組み合わせと緩衝材の厚さを示している(例:ST546は前:5cm,後:4cm,緩衝材厚:6cmを表す)。なお、実験Bは試験体数が少なく、一体型(Type-A)の貫通限界厚と裏面剥離限界厚を特定することができないため、参考データとして本実験と同一諸元の試験体を用いた予備実験(衝突速度:約200m/s,コンクリート静的圧縮強度:約300kgf/cm²)の損傷結果を縦軸上に表示した(図中、○印、△印および□印)。図より基準板厚8cmの場合をみると、一体型(Type-A)と積層型(Type-C)のいずれの場合も貫通(●印)しており緩衝材による貫通阻止の効果は認められない。基準板厚9cmの場合には、一体型(Type-A)が貫通(○印)したのに対し、積層型(Type-C)は緩衝材の厚さが3cmと6cmのいずれの場合にも裏面剥離を防止し、ひびわれ(■印)にとどまっている。基準板厚10cmの場合につい

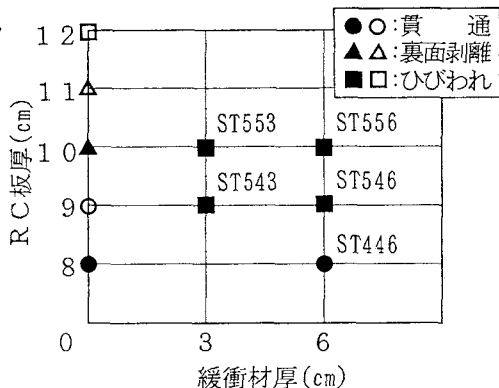


図-8 RC板厚～緩衝材厚関係
(実験B, Type-A, C)

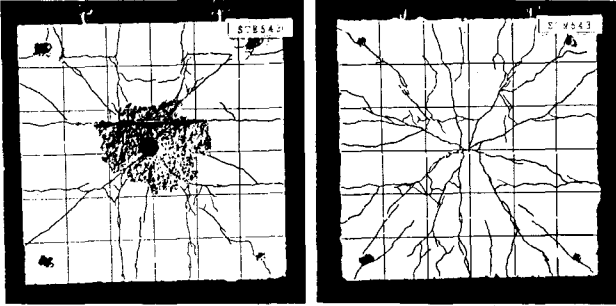
ても一体型(Type-A)が裏面剥離(▲印)しているのに対し、積層型(Type-C)は裏面剥離を完全に防止している。また、図より、積層型(Type-C)において局部損傷を防止した基準板厚9cmと10cmの試験体(4体)のうち、総板厚(RC板厚と緩衝材の厚さを足した厚さ)が最も小さいのは試験体ST543の12cmである。本実験では、一体型(Type-A)の裏面剥離限界厚が11~12cm付近(図中、▲印と□印の間)の値と推定されることから、試験体ST543の緩衝材である厚さ3cmのネオプレンゴムスポンジの等価コンクリート厚は約2~3cmとなる。ただし、試験体ST446のように総板厚が14cmの場合でも貫通するケースがあるので、ここでいう等価コンクリート厚とは、貫通ではなく、裏面剥離を防止する衝撃緩衝材の効果を表す尺度である。また、本実験では、緩衝材の有無による効果を調べるために空隙型(Type-B)についても同様の実験を行ったが、基準板厚9cmの場合について空隙型(Type-B)と積層型(Type-C)の後壁(第2壁)裏面の損傷の程度を比較したところ、顕著な差異が認められた(写真-3)。試験体はいずれも後壁より前壁が厚い場合(前:5cm,後:4cm)であり、空隙間隔および緩衝材の厚さは3cmである。写真-3より、空隙型(Type-B)が貫通したのに対し、積層型(Type-C)については裏面剥離を完全に防止し、放射状ひびわれにとどまっている。基準板厚9cmは、本実験条件では貫通限界厚に近い厚さであるために空隙型(Type-B)は裏面剥離を防止できず、貫通破壊に至ったものと考えられる。一方、積層型(Type-C)は、ネオプレンゴムスポンジが衝撃吸収材として有効に機能し、後壁への局所的な衝撃を抑制したため裏面剥離が発生しなかったと考えられる。

3.2 局部応答

(1) 加速度応答

図-9は、加速度応答波形の一例である。図より、約0.1msecという非常に短い時間で加速度が最大値に到達し、すぐに減衰する傾向が認められる。また、試験体中央部(G1)から15cm離れた点(G4)では、加速度がピークに達するまでに最大0.26msecの時間差が生じており、局所的な変形状態が確認できる。

図-10に試験体裏面に生じた最大加速度分布を比較した一例を示す。図より、衝突点近傍における試験体裏面の加速度は、一体型(Type-A)に比べて空隙型(Type-B)および積層型(Type-C)の方が緩やかな勾配で減衰しており、通常のRC板よりも2重RC板の方が局所的な応答を抑制していることがわかる。これは、局部損傷状況を比較した結果と一致している。また、図より衝突点から半径15cm以外の範囲では加速度は極めて小さく、衝撃力算定の際には半径15cm以内の部分の有効質量部分とみなせばよい。



(a) 緩衝材なし(Type-B) (b) 緩衝材あり(Type-C)

写真-3 緩衝材(ネオプレンゴムスポンジ)の効果
(後壁(第2壁)裏面の局部損傷状況)

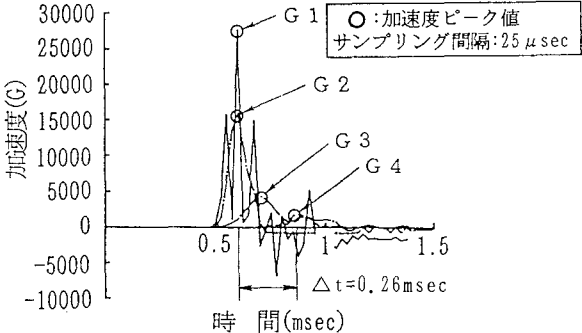


図-9 加速度応答波形の一例
(実験A, Type-A:10cm)

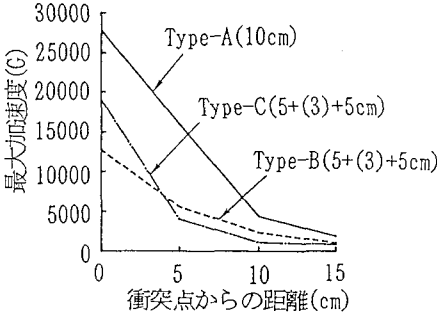


図-10 加速度分布の一例(実験A)

(2) 変位応答

実験の結果、衝突面側の挙動については、衝突直後の試験体の変位はほとんど検出されず、飛翔体の衝突位置近傍を除いては、RC試験体自体にほとんど変形および変位が生じないと考えられる。裏面側の挙動については、図-11のように加速度計が衝突を検知した時刻 (t_1) と試験体裏面が変位を開始する時刻 (t_2) には約0.825msecの時間差が生じている。このことからRC試験体の裏面については、飛翔体の衝突と同時に変位が生じるのではなく、衝突現象が終了したのち変位し始めることがわかる。

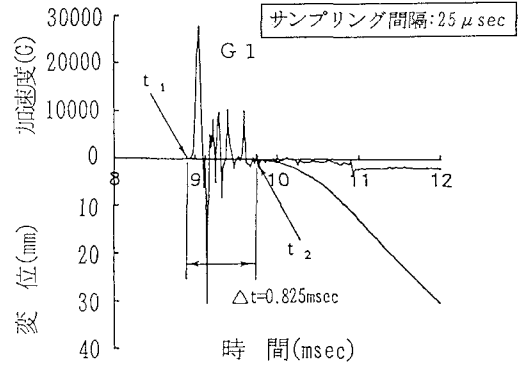


図-11 加速度、変位～時間関係
(実験A, Type-A: 9cm)

3.3 2重RC板の裏面剥離限界厚および貫通限界厚の推定

RC構造物の耐衝撃性を評価し、それを耐衝撃設計に導入するには、任意の重量、形状、速度を有する飛来物が衝突した場合の貫入深さ、裏面剥離限界厚および貫通限界厚を推定する評価式や評価方法が必要である。¹⁰⁾ここでは、緩衝材を有しない空隙型 (Type-B) の2重RC板について検討を行う。

(1) 簡易推定法

2重RC板の局部損傷を推定するには、飛翔体が前壁 (第1壁) を貫通した後の速度、すなわち残留速度を算定する必要がある。つまり、既往の局部損傷評価式は飛翔体の衝突速度を最重要パラメーターとしているので、2重RC板の前壁 (第1壁) には評価式をそのまま適用できても後壁 (第2壁) には残留速度を求めないかぎり適用することはできない。そこで、前壁に対する衝突速度 (初速度) を一定とし、任意の前壁厚での残留速度を算定し、その残留速度を後壁に対する衝突速度とみなせば後壁に評価式を適用することができると考える。ただし、この場合、飛翔体は前壁を貫通した後、一定の残留速度で飛翔するものと仮定している。本研究ではこの方法によって、任意の前壁厚に対する後壁の裏面剥離限界厚および貫通限界厚を推定する。また、2重RC板の前後の板厚の組み合わせによる局部損傷の程度を推定する。

(2) 局部損傷評価式

従来の研究において、剛飛翔体を対象とした局部損傷評価式は数多く提案されている。なかでも、修正NDRC式は、理論的、実験的考察に基づいているので任意の実験結果に対しても比較的精度良く適用できると考えられる。¹¹⁾ここでは、前述した簡易推定法に、以下に示す修正NDRC式を準用して2重RC板の貫通限界厚および裏面剥離限界厚を推定する。

貫入深さ評価式：

$$X = 0.00697 \sqrt{N \cdot W \cdot D \cdot (V/D)^{1.8} / \sqrt{f_c}}, \quad X \leq 2D \quad (1a)$$

$$X = \frac{1.21 \cdot 10^{-5} \cdot N \cdot W \cdot (V/D)^{1.8}}{\sqrt{f_c}} + D, \quad X \geq 2D \quad (1b)$$

ここに、X: 貫入深さ (cm), N: 先端形状係数 (平坦: 0.72), W: 飛翔体の重量 (kgf), D: 飛翔体の直径 (cm), V: 飛翔体の衝突速度 (cm/sec), f_c : コンクリート圧縮強度 (kgf/cm²)、である。

裏面剥離評価式：

$$X_s = 7.91 \cdot X - \frac{5.06 \cdot X^2}{D}, \quad X < 0.65D \quad (2a)$$

$$X_s = 2.12 \cdot D + 1.36 \cdot X, \quad X > 0.65D \quad (2b)$$

適用外 $X > 11.75D$

ここに、 X_s : 裏面剥離限界厚 (cm)、である。

貫通評価式：

$$X_p = 3.19 \cdot X - \frac{0.718 \cdot X^2}{D} \quad X < 1.35D \quad (3a)$$

$$X_p = 1.32 \cdot D + 1.24 \cdot X \quad X > 1.35D \quad (3b)$$

適用外 $X > 13.5D$

ここに、 X_p :貫通限界厚(cm)、である。

(3) 飛翔体の残留速度の算定

残留速度は、基本的には次に示す運動エネルギーのつり合い式によって求めることができる。

$$\frac{1}{2} m V_r^2 = \frac{1}{2} m V_0^2 - \frac{1}{2} m V_p^2 \quad (4)$$

ここに、 m :飛翔体の質量、 V_r :残留速度、 V_0 :衝突速度、 V_p :ちょうど貫通する速度、である。

しかしながら、実際の衝突現象においては局部損傷によるエネルギー消費を無視することはできない。Kar式では図-12に示すような円錐台の形状をした飛散コンクリートを仮定し、これによるエネルギー消費を考慮して式(4)を以下のように修正している。^{1,2)}

$$V_r^2 = \frac{V_0^2 - V_p^2}{(1 + W_t/W)} \quad (5)$$

ここに、 W_t :飛散コンクリート重量、 W :飛翔体重量、である。

式(5)から残留速度 V_r を算定するには、飛翔体がコンクリート板をちょうど貫通する速度 V_p を与える必要がある。速度 V_p は任意の前壁厚を貫通限界厚とした場合の貫入量 X を式(3a)、(3b)から逆算し、求めた貫入量 X を式(1a)、(1b)に代入して算出することができる。すなわち、式(3a)、(3b)を貫通限界厚(前壁厚)から貫入量 X を求める式に変換する。

$$X = \frac{3.19 \cdot D \cdot \sqrt{(10.176 \cdot D^2 - 2.872 \cdot D \cdot X_p)}}{1.436} \quad X < 1.35D \quad (6)$$

$$X = (X_p - 1.32 \cdot D) / 1.24 \quad X > 1.35D \quad (7)$$

適用外 $X > 13.5D$

上式で求めた貫入量 X を式(1a)、(1b)に代入すれば貫通限界厚 X_p (前壁厚)における衝突速度、すなわち、ちょうど貫通する速度 V_p を計算することができる。速度 V_p が求まれば式(5)を用いて、残留速度 V_r を算定することができる。

(4) 裏面剥離限界厚および貫通限界厚の算定

(3)で求めた残留速度 V_r を後壁(第2壁)に対する衝突速度 V_0 とみなせば、修正NRC式(式(1a)~(3b))により後壁の裏面剥離限界厚および貫通限界厚が算定できる。

(5) 実験結果との比較(実験A)

図-13に、実験Aの一体型(Type-A)および空隙型(Type-B)に生じた損傷結果と計算結果の比較を示す。縦軸が後壁厚、横軸が前壁厚であり、空隙型(Type-B)については前後の板厚の組み合わせ方の相違による損傷を示している。一体型については、前壁厚=0cmの場合とみなし縦軸上に表示している。貫通限界厚は貫通(図中、●印)と裏面剥離(▲印)の間に存在するとみなせば、本実験結果から前後壁の組み合わせ板厚9cmと10cmを示す直線(一点鎖線)の中間付近の値であり前後壁の板厚の関係を示す直線にほぼ平行している。このことから、貫通は前後の板厚の組み合わせには無関係でコンクリートの板厚の大きさに依存するといえる。一方、裏面剥離限界厚は、裏面剥離(▲印)とひびわれ(■印)の境界線上にあるとみなせるが、実験数が少なかつたため(■印は一つしかない)特定することができない。2重RC板は前後の板厚の和が一定の場合には前壁

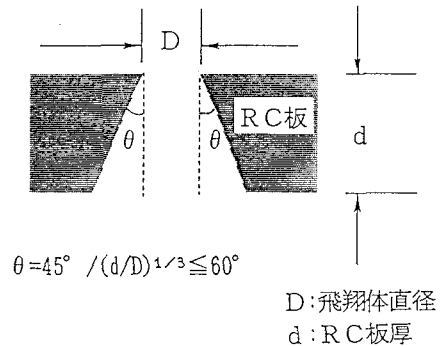


図-12 飛散コンクリート部分の仮定(Kar式)

が厚いほど裏面剥離を抑えるという本実験結果から推定すれば、組み合わせ板厚10cmの線よりやや左上がりの傾向を示すと考えられる。

一方、Kar式(式(5)) および式(1a)～(3b)を用いて2重RC板の貫通限界厚および裏面剥離限界厚を計算すると図-13中の破線で示す結果が得られる。計算結果(図中、破線)は、前述の簡易推定法により衝突速度を170m/sと一定にし、前壁厚(横軸)を変化(0～14cm)させた場合の後壁の裏面剥離限界厚および貫通限界厚(縦軸)を示したものである。図をみると、例えば前壁厚が7cmの場合、貫通しないためには後壁厚は4.6cm、裏面剥離しないためには8.9cmが必要となる(図中、○印)。この結果は実験結果(貫通限界約2cm、剥離限界約3cm)に対し大きく異なっている。この原因として、Kar式では残留速度を過大評価していることが考えられる。前述したように、Kar式の仮定ではコンクリートの飛散による局部損傷のエネルギー消費を考慮している。そこで、本実験(実験A)で測定したコンクリート剥離物の飛散角度(θ)とKar式の仮定による θ を比較してみるとかなり異なる傾向が認められる(図-14)。すなわち図より、Kar式の仮定が板厚の増加に伴い θ が 60° から 30° 付近まで減少するのに対し、実験結果(●印：前壁の θ)ではほぼ $\theta=45\sim 55^\circ$ 付近の一定の値となっている。本実験の条件下(衝突速度170m/s、板厚10cm以下)で貫通する場合については飛散角度(θ)はほぼ一定であり、Kar式の仮定を本実験にそのまま適用すると板厚の増加にしたがって局部損傷によるエネルギー消費が過小に評価されることになる。その結果残留速度が過大に評価されるため、かなり大きめの評価になると考えられる。そこで、実験結果に基づいてコンクリートの飛散角度を一定($\theta=50^\circ$)にした場合について試算を行った(図中、実線)。図より、前壁厚が薄い場合(3cm程度)にはやや大きめの値となるが、実験結果にかなり近い値が得られる。以上のことから、2重RC板の貫通限界厚および裏面剥離限界を推定する場合には、局部損傷によるエネルギー消費、すなわち飛散角度 θ の大きさを適切に評価しないとかなり過剰の板厚設計となる。

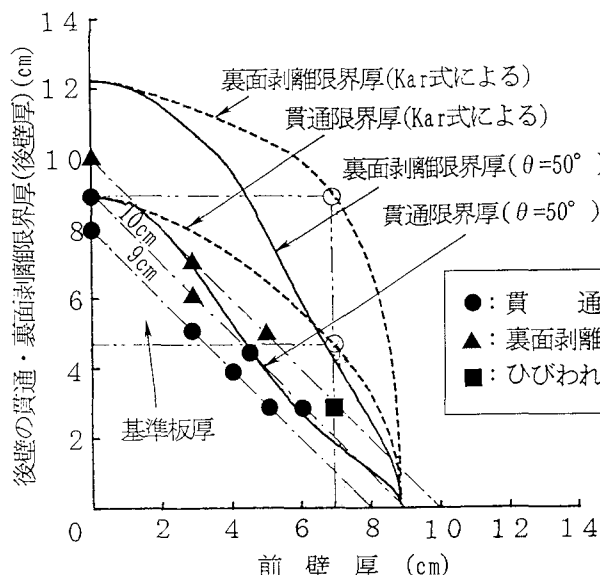


図-13 2重RC板の後壁の貫通・裏面剥離限界厚
(実験結果との比較)

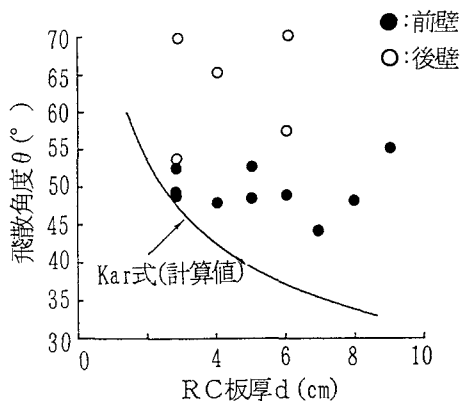


図-14 飛散角度 θ ～板厚d関係
(実験A, Type-A, B)

4. 結論

本実験で得られた成果は、以下のように要約できる。

- (1) 通常の一体型RC板と等しいコンクリート厚をもつように2枚のRC板を組み合わせた2重RC板は、

一体型構造に比べ局部損傷のうちとくに裏面剥離を小さく抑える。また前後壁の和が等しければ、前壁が厚いほど後壁の裏面剥離を抑制できる。

(2) 本研究で行った飛翔体の高速衝突実験（衝突速度約170m/s）に対しては、硬質ウレタンのように貫通抵抗力が小さく脆性的に破壊する材料は緩衝材としての効果は期待できない。弾性材料であるネオプレンゴムスポンジは、貫通阻止の効果はないが裏面剥離に対しては効果がかなり期待できる。

(3) 加速度分布の計測結果から、飛翔体の高速衝突に対してRC板は衝突点を中心に直径30cmの範囲で局部的に応答することが認められた。また変位応答から、衝突直後はRC板はほとんど変位せず、衝突現象終了後に変位を開始することが認められた。

(4) 既往の局部損傷評価式を用いて2重RC板の貫通・裏面剥離限界厚を推定する場合、局部損傷によるエネルギー消費、すなわち飛散コンクリート重量を適切に評価しなければ、かなり過大な設計となってしまう。

最後に、本実験を行うにあたり、首藤誠志君、山田俊二君（研究当時、防衛大学校理工学研究科学生）および現理工学研究科学生 小暮幹太君および岡本貢一君の援助を得たことを付記する。また、日清紡西新井化成工場技術課の方々に試料提供ならびに技術上の貴重な御助言を頂いた。ここに謝意を表する。

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）：U24、平成3年7月。
- 2) 藤井、宮本：RC壁体構造の耐衝撃性に関する実験的研究、土木学会第41回年次学術講演会概要集、pp.293-294、昭和61年11月。
- 3) 小島 功：衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート板の局所挙動に関する実験的研究、FAPIG、第124号、pp.24-34、1990。
- 4) 岸、中野他：三層緩衝構造の緩衝効果に関する室内実験、構造工学論文集、Vol.38A、pp.1577-1586、1992。
- 5) 大野、山田、上田他：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。
- 6) 高橋、大野、内田、太田：高速載荷を受けるRCはりの終局限界性能に及ぼす横拘束筋の効果とその評価、コンクリート工学論文集、第1巻第1号、pp.25-35、1990.1。
- 7) 小堀鐸二研究所、大崎総合研究所、多治見エン지니어リングサービス：高速載荷実験及び解析的検討に関する報告書、1990.10。
- 8) 山本、園田、石川、清水：硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成はりの衝撃実験に関する一考察、第19回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、pp.30-31、1992.3。
- 9) 松本、高橋、大野、内田：飛翔体の高速衝突に対するコンクリートの局部破壊、落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp.25-28、1991.3。
- 10) 大沼、伊藤、岸：鉄筋コンクリートスラブの衝撃応答特性について、第6回コンクリート工学年次講演会概要集、pp.637-640、1984。
- 11) 伊藤、白井、大沼、能町：剛飛翔体の衝突に対する鉄筋コンクリート床版の設計評価式、落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp.19-24、1991.3。
- 12) 武藤構造力学研究所：高速飛来物に対する構造評価のための基礎実験のうち小型実験（最終報告書）、1987.6。

(1992年9月21日受付)