飛来物の高速衝突を受ける鋼製ライナー付き鉄筋コンクリート板 の耐衝撃性に関する実験と解析

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDIES ON IMPACT RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE PLATES WITH STEEL LINERS SUBJECTED TO HIGH-VELOCITY IMPACT OF PROJECTILE

森川 博司*, 河西 良幸**, 坪田 張二**, 内田 孝***

大野 友則****, 小暮 幹太*****

*Hiroshi MORIKAWA, Yoshiyuki KASAI, Haruji TSUBOTA, Takashi UCHIDA,
Tomonori OHNO and Kanta KOGURE*

In recent years, extensive analytical and experimental studies have been carried out to establish a rational structural design method for reinforced concrete structures against local damage caused by the impact of various external projectiles. Through these studies, several techniques for improving the impact resistance of reinforced concrete plates have been proposed. Of these techniques, attaching a steel liner on the rear face of the plates is considered to be one of the most effective methods. The object of this study is to evaluate quantitatively the effect of a steel liner attached to a reinforced concrete plate in preventing local damage caused by the impact of rigid projectiles. To achieve the object, extensive impact tests were carried out with a total of fifty reinforced concrete panels of 60cm-square. Based on test results, the effect of a steel liner on both scabbing and perforation was evaluated quantitatively by converting steel liner with a certain thickness into the equivalent concrete thickness. And evaluation of the liner effect was attempted analytically using the Discrete Element Method and the fracture process of various damage modes with and without the steel liner could be well simulated.

*Keywords : reinforced concrete, steel liner, equivalent concrete thickness, high-velocity impact,
discrete element method, dynamic increase factor*

鉄筋コンクリート、鋼製ライナー、等価コンクリート厚さ、高速衝突、
個別要素法、動的増加率

1. はじめに

建築構造物の中には、その用途や環境によって車両、航空機の衝突、危険物の爆発に代表される人為的事故や落石崩落、土石流などの自然災害によって発生する衝撃外力を受ける場合がある。これらの構造物が衝撃外力を受けて破壊すれば、甚大な被害が発生することが予想されるので設計にあたって衝撃荷重に対する安全性も確保することが求められるようになってきた。

衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の応答は、載荷直後に載荷位置近傍に比較的短時間で発生する応力波による応答と、やや遅れて生じ比較的長時間継続する弾塑性応答の2つに大別され、損傷が及ぶ範囲から、前者の応答による損傷は局部損傷、後者は全体損傷とよばれている。図-1に示すように局部損傷は、飛来物がターゲットの衝突面にめり込む貫入、ターゲット表面の損傷とともにターゲット裏面のコンクリートが飛散する裏面剥離および飛来物がターゲットを突き抜ける貫通に分類

される。全体損傷は、曲げ破壊やせん断押し抜き破壊であり静的な荷重と同様な破壊性状を示す。

構造物の質量に比して質量が小さい飛来物が高速で衝突する場合には、全体損傷よりも局部損傷による破壊が重要な問題であり、局部損傷の大きさを推定する数多くの評価式^{例え1~3)}が報告されている。また、局部損傷に対する耐衝撃性向上を目的とした研究も近年盛んに行われている。鋼製ライナーで補強する方法⁴⁾や緩衝材と組合せて複合構造とする方法⁵⁾などが提案されている。Barr⁴⁾は、鉄筋コンクリート板(RC板と略す)の衝突面や裏面に鋼製ライナーを取付けた衝突実験を実施し、ライナーの取付け位置によって貫通抵抗に変化が生じ、裏面に取付けた場合、局部損傷を改善する効果があることを報告している。Walter⁶⁾は、鋼製ライナーを取付けたRC板の貫通防止効果について、鋼板とRC板に対する個別の実験から、鋼製ライナーの厚さを等価なコンクリート厚さに換算する式を提案して、英国原子力エネ

* 鹿島情報システム部 課長

** 鹿島技術研究所 室長・工博

*** 防衛大学校土木工学科 元教授・工博

**** 防衛大学校土木工学科 教授・工博

***** 防衛大学校土木工学科 研究員・工修

Chief, Information Processing Center, Kajima Corporation

Chief, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

Ex-prof., Dept. of Civil Engineering, National Defense Academy, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Civil Engineering, National Defense Academy, Dr. Eng.

Research Fellow, Dept. of Civil Engineering, National Defense Academy, M. Eng.

ルギー⁷⁾は、衝撃荷重に対する鉄筋コンクリート構造物の設計ガイドラインで鋼製ライナーをRC板裏面に取付けた効果を等価な鉄筋比に換算して求める局部損傷評価式を提案している。武藤⁸⁾は、実物大のRC板に航空機エンジンを衝突させる耐衝撃性研究の中で鋼製ライナーをRC板の裏面に取付けた衝突実験を行い、鋼製ライナーは衝撃による損傷を防止する効果があることを報告している。しかし、これらの研究は、鋼板とRC板の個別の実験など限られた実験に基づく報告であり、鋼製ライナーによる耐衝撃性効果を定量的に評価する定まった方法がない現状である。また、鋼製ライナー付きRC板のような複合構造物の局部損傷を解析した報告は、ほとんど例がなくメカニズムの解明には至っていないと思われる。

本研究では、RC板を鋼製ライナーで補強し、鋼製ライナーによる裏面剥離や貫通の抑止効果を検討することを目的としたRC板の高速衝突実験を行い、RC板の厚さ、鋼板の厚さ、取付け位置の相違が耐衝撃性に及ぼす影響を調べ、鋼製ライナーの耐衝撃性効果を等価なコンクリート厚さとして定量的に評価することを試みる。さらに、個別要素法⁹⁾を用いて衝突実験解析を行い、RC板の衝撃損傷の過程や鋼製ライナーの抵抗機構の解明を試みる。

図-1 飛来物の衝突による構造物の応答

図-2 試験体の概要

2. 衝突実験

2.1 試験体

衝突実験に用いた試験体の概要を図-2に示す。寸法は縦横600×600mmで、厚さを50mmから160mmまで変化させ11種類の板厚を設定している。鉄筋の配筋はすべて同一で、D6鉄筋を用いて間隔は100mm、X Y 2方向の上端下端の複配筋とした。試験時のコンクリートの静的圧縮強度は、平均243kgf/cm²であった。

厚さ0.8, 1.2, 1.6, 2.0mmの4種類の薄い鋼板(材質SS41)を600×600mmの大きさに加工してRC試験体の裏面に取付けた。鋼板の静的な引張強度は厚さによってやや相違があるが、3.0~3.2tf/cm²で、伸びは22~26%であった。取り付け方法としては、スタッド(M3ボルト、径3mm、長さ35mmを50mm間隔に電気溶接)で固定する方法とエポキシ系接着剤で鋼板をそのままコンクリート面に接着する方法の2種類を用いた。図-2(b)にスタッドの配置状態を示す。

表-1に示すようにコンクリート厚さ、鋼製ライナー厚さおよび取付け方法の3つをパラメータとした50体の衝突実験を行った。No.1からNo.11試験体は、鋼製ライナー効果を比較するためのライナーのない試験体である。なお、参考試験体としてNo.49試験体は衝突面に、No.50試験体は表と裏両面にライナーを取付けている。

2.2 飛来物

本実験で用いた飛来物は図-3に示すように、頭部、胴体部および尾部より構成されている。頭部は直径35mmの鋼製で先端形状は、平坦である。尾部はプラスチックでこの部分をトルクリングで拘束し発射管内に固定する

図-3 飛来物の概要

図-4 実験装置の概要

ために用いた。胴体部は、一般構造用鋼管を切削加工して製作した。胴体部の諸元を表-2に示す。なおこの胴体部を用いて行った同一条件（衝突速度：170m/sec）での別実験において衝突後の胴体部に生じた変形は極めて小さかったことから、本実験で用いる飛来物は剛飛来物と見なすことができる。飛来物の全重量は約430gf、衝突速度は170m/secである。この飛来物をRC板に衝突させた

場合の貫通限界厚さと裏面剥離限界厚さをChang式³⁾によって算定すると、それぞれ8.9cm、14.9cmである。

表-2 飛来物胴体部の諸元

材質	長さ	肉厚	直径	座屈強度
炭素鋼 STK41	50mm	4.2mm	39.5mm	19.02tonf

表-1 実験パラメータと実験結果

No.	コンクリート 厚さ t(mm)	損傷 モード	前面のクレーター		裏面剥離 直径 (mm)
			直径 (mm)	深さ (mm)	
ラ	1 50	●	90	貫通	150
	2 60	●	90	貫通	160
	3 70	●	70	貫通	170
イ	4 80	●	140	貫通	170
	5 85	●	89	貫通	200
ナ	6 90	△	120	18	210
	7 100	△	70	27	300
ー	8 110	△	135	17	0
	9 120	□	150	33	0
無	10 140	□	140	29	0
	11 160	□	160	29	0

表-3 損傷モード

ライ ナ ー 無	●	貫通 Perforation	飛来物が完全にターゲットを貫通する状態
	△	裏面剥離 Scabbing	コンクリートの破片がターゲットの裏面より飛散する状態
	□	貫入 Penetration	ターゲットの衝突面にクレータができるが、裏面剥離は生じない状態
ラ イ ナ ー 有	●	貫通 Perforation	飛来物が完全にターゲットと鋼製ライナー部分を貫通する状態
	◆	穿孔 Splitting	鋼製ライナーに穿孔が生じるが、飛来物の貫通は阻止されている状態
	◇	膨らみ Bulging	鋼製ライナーに膨らみが生じ、残留変形している状態
	□	貫入 Penetration	ターゲットの衝突面にクレータができるが、鋼製ライナーに変形や損傷が生じない状態

No.	厚さ		ライナーの 設置面	ライナー 固定方法	損傷 モード	前面のクレーター		ライナーの膨らみ			
	コンクリート t(mm)	ライナー ts(mm)				直径 (mm)	深さ (mm)	直径 (mm)	深さ (mm) (穿孔の大きさ) (mm)		
ラ	12	50	裏面	スタッド	●	80	貫通	200	貫通	(132×20)	
	13	60			◆	110	60	290	43		
	14	70			◇	90	70	350	26		
	15	80			◇	70	46	230	18		
	16	90			◇	80	23	200	9.2		
	17	100			◇	150	25	150	3.5		
	18	105			□	115	17	150	ほぼ0		
	19	120			□	135	27	0	0		
	20	140			□	145	34	0	0		
	イ	21			50	●	100	貫通	230		
22		60			◆	90	60	300	46		
23		65			◇	90	65	350	29		
24		70			◇	130	70	250	22		
25		80			◇	110	42	200	10		
26		90			◇	90	22	230	66		
27		95			□	137	20	150	ほぼ0		
28		100			□	130	33	150	0		
29		120			□	150	20	0	0		
ナ		30			50	◆	100	50	250	-	(99×28.7)
	31	55			◇	94	55	-	36		
	32	60			◇	90	60	280	28		
	33	70			◇	90	49	250	20		
	34	80			◇	100	34	250	13		
	35	90			◇	120	27	200	7		
	36	95			□	115	16	0	0		
	37	100			□	120	19	200	0		
	38	120			□	165	30	0	0		
	ト	39			50	◇	80	50	200	34	
40		90			□	130	20	0	0		
有	41	50			エポキシ	●	90	貫通	100	貫通	
	42	70				◇	110	35	250	18	
	43	80				◇	100	42	250	11	
	44	60				◇	80	60	200	24	
	45	70				◇	95	56	300	14.3	
	46	70				◇	110	63	230	18	
	47	90				◇	130	22	200	5.2	
	48	100				◇	90	24	200	3	
49	70	1.2			前面	スタッド	●	40	貫通	154	貫通
50	70	前+裏			◇		40	20	350	22	

2.3 実験装置

図-4に示す高速衝突試験装置は、比較的軽量(0.5kgf程度)の物体を高速で発射させる装置である。飛来物の発射は高速度载荷装置で瞬間的に圧縮された空気を利用して行われ、長さ250cmの加速管の一端に固定された飛来物に高圧空気が作用して発射する。試験体は飛来物が衝突した際に衝突方向に移動可能なようにワイヤーでつり下げている。

3. 実験結果

3.1 試験体の破壊状況

試験体の条件と実験結果を表-1に、損傷モードの分類を表-3に、それぞれ示す。ここで、貫通とは飛来物が試験体中を完全に通過する場合、裏面剥離は衝突面を

中心としたある範囲内の裏面コンクリートの破片が飛散する状態、貫入は試験体の衝突面にクレータができるが裏面には損傷が生じない状態である。代表的な試験体の破壊状況を、図-5に示す。鋼製ライナーのないコンクリート厚さ60mmのNo.2試験体とコンクリート厚さ50mmで1.2mmのライナーを取付けたNo.21試験体は、ともに飛来物が貫通している(aとb図参照)。同じライナー厚さでコンクリート厚さを60mmとしたNo.22試験体(c図)は、ライナーに長い穿孔を生じているが飛来物は貫通していない。この損傷モードを穿孔(splitting)と名づける。コンクリート厚さを80mmとしたNo.25試験体(d図)は、コンクリート表面にかなりの損傷が生じ裏面のライナーには膨らみ残留変形が生じているが、貫通せずコンクリートの裏面剥離物の飛散を防いでいる。この損傷モードを膨らみ(bulging)と名付ける。

図-5 実験結果の損傷状況

図-6 鋼製ライナー厚さと鉄筋コンクリート厚さ

鋼製ライナーの取付け方の相異として、スタッドボルトによる場合(c図)とエポキシ樹脂による場合(e図)を比較すると、損傷状況に多少相異が認められた。すなわち、エポキシ系接着剤で接着したライナーの変形量が、スタッドボルトで取付けた場合より小さくなる結果を得た。(f)と(g)図は、鋼製ライナーを衝突面側だけに取付けたNo. 49試験体における両面の損傷状況である。飛来物は鋼製ライナーおよびコンクリートを貫通しており、耐衝撃性の効果はほとんど認められなかった。(h)と(i)図は、鋼製ライナーを衝突面と裏面の両面に取付けたNo. 50試験体の両面の損傷である。衝突面は、No. 49試験体と同様に飛来物が鋼製ライナーを貫通しているが、裏面は典型的な膨らみモードを示した。本実験においては、衝突面にライナーを取り付けても裏面からのコンクリートの剥離にはほとんど効果がない結果となった。以上の結果から、コンクリート試験体の裏面に鋼製ライナーを取付けることにより、コンクリート厚さが等しい場合は損傷の程度が小さくなることが認められた。

3.2 裏面鋼製ライナー効果の定量評価

図-6は、コンクリート厚さと裏面に取付けた鋼製ライナー厚さと損傷モード(損傷の相異)の関係を示したものである。図中の実線および破線は、実験で得られた損傷モードに対してモードが変化する境界を仮定した線である。試験体数が少ないので厳密ではないが、飛来物の貫通を阻止した最小厚さを貫通限界(実線で示す)として定義すると、鋼製ライナーの厚さの増加と共に指数的に減少する傾向がある。穿孔限界は、穿孔モードと膨らみモードの間の境界として評価でき、ライナー厚さの

図-7 鋼製ライナー厚さと等価コンクリート厚さ

増大と共に線形的に減少する。この限界厚さは、ライナーが無い場合の貫通限界と同様である。膨らみ限界は、裏面剥離の大きさと同程度の膨らみをライナーに生じさせる最小のコンクリート厚さとして定義され、貫入と膨らみの境界を表しており、ライナーのない場合の貫入と裏面剥離モードの境界、すなわち裏面剥離限界に対応する。膨らみ限界は、穿孔限界と同様にライナーの厚さの増大と共に線形的に減少する。鋼製ライナーが従来言われていた裏面剥離の抑制のみならず、貫通に対しても抑制効果があることがわかる。鋼製ライナーの厚さが零、すなわち鋼製ライナーの無い試験体のコンクリート厚さを基準にすれば、鋼製ライナーを取り付けることにより各限界厚さに相当するコンクリート厚さは低減していく。減少した分のコンクリート厚さが鋼製ライナーの効果とみなせば、減少厚さは鋼製ライナーと同じ効果を与える等価なコンクリート厚さとみなすことができる。例えば、ライナー無しの試験体のコンクリート貫通限界厚さは85mmで、厚さ1.2mmの鋼製ライナーを取付けた場合、図-6の白丸で示すようにコンクリート厚さ53mmで貫通限界になる。したがって、1.2mmの鋼製ライナーによる等価コンクリート厚さは32mm(=85mm-53mm)とみなすことができる。このようにして求めた各限界曲線から得られた等価コンクリート厚さを鋼製ライナーの厚さとの関係で示すと次式となり、図-7のように表される。

$$\text{貫通限界} \quad t_{eq,p} = 30 \times t_s^{0.4} \quad (1)$$

$$\text{穿孔限界} \quad t_{eq,s} = 21 \times t_s \quad (2)$$

$$\text{膨らみ限界} \quad t_{eq,b} = 15 \times t_s \quad (3)$$

ここに、 $t_{eq,p}$ 、 $t_{eq,s}$ 及び $t_{eq,b}$ はそれぞれ貫通限界、穿孔限界および膨らみ限界に対する等価なコンクリート厚さ(mm)、 t_s は鋼製ライナーの厚さ(mm)である。ただし、これらの限界を表す関係式は、本実験の範囲の近似式であり、特に穿孔限界は、鋼製ライナー厚さが1.6mm以下で成り立つものである。貫通限界に対しては、Walterら⁶⁾も提案しているが、本提案式の貫通限界厚さの方がやや大きい傾向にある。

4. 個別要素法による解析

RC板の衝突実験結果を個別要素法によりシミュレーション解析し、解析手法の適用性を検証するとともに、実験では観察の難しい衝突時の挙動を把握する。

4.1 解析法の概要

個別要素法はコンクリートや鉄筋の媒質を粒子の集合体として考え、個々の要素が運動方程式を満足しつつ、接触時の要素間の力の伝達によって全体の動力学的特性を表す手法である。本解析では、文献9に示す方法を採用しており、その概要を以下に示す。要素として円盤剛体要素を用い、要素間に働く力は法線方向と接線方向のばねとダッシュポットで表現する。運動方程式の解法には陽的積分法を用い、時間増分内は反復計算をせず、時間増分ごとに時間積分後の各要素位置を更新する手法を採用している。解析に用いるコンクリートのばね定数は、要素を等径六角形配置とし、連続置換によって導かれた評価式⁹⁾によって設定している。Mohr-Coulomb型の破壊基準により圧縮、せん断降伏および引張破壊を表し、圧縮、せん断降伏後は力を一定とし、引張破壊後は力は零となり、要素は自由運動すると仮定している。解析対象としている載荷速度 10^2m/s のオーダーの衝撃問題では、RC板に生じる歪み速度が $10^0\sim 10^2/\text{s}$ 程度¹⁰⁾であり、衝撃応答に大きな影響を及ぼすことが報告されている例えば11、12)。本法では、この特性を歪み速度に依存した動的強度増加率で表現し、同程度の歪み速度を対象した藤本ら¹³⁾の提案式を採用している。

4.2 解析対象

2章で実施した衝突実験のうち、表-4に示す4体を選んで解析対象とする。これらは、コンクリート厚さ80mmでライナーの有無によって貫通と膨らみという損傷に差のあったNo.4とNo.25試験体、ライナーに穿孔の生じたコンクリート厚さ60mmのNo.22および貫入のみを生じたコンクリート厚さ100mmのNo.28である。

4.3 解析モデル

解析モデルは、図-8に示すように60×60cmのスラブのうち半径30cmの中心軸を対称軸とした回転体である軸対称モデルとし、実験の自由支持条件を模擬し、解析モデル周辺をフリーとした。コンクリートは、半径0.2cmの

等径円盤要素六角形配置でモデル化し、個々の要素は要素間ばねとダッシュポットで結合されている。

鋼製ライナーは、膜要素として半径方向と円周方向のばね評価をし、コンクリートを表す円盤剛体要素の要素間に付加してモデル化した。半径方向と円周方向力の関数として表されるvon Misesの降伏条件によって降伏を判定し、降伏条件を越える力が発生すると、力を一定に保持するものとする。その後要素間の層間変形が限界を越えると力を零とし、自由運動すると仮定している。鉄筋やスタッドはその位置の要素間に軸方向のみに剛性を持つバイリニア型のばね要素でモデル化している。

飛来物は重量430gf、外径35mmで厚さ25mmの剛な鋼製物体を飛来物とし、半径0.2cmの等径円盤要素でモデル化した。衝突速度は170m/secとした。コンクリートとライナーに設定するパラメータは、実験値を基本に定めている。ただし、コンクリートの内部摩擦角は摩擦係数を0.2と仮定して定めた。解析に用いたパラメータを表-5に示す。解析刻みは、安定条件より $0.2\times 10^{-6}\text{sec}$ とし1.5msecまで7500ステップ解析した。

表-4 解析対象試験体と実験結果

試験体条件			実験結果			
試験体番号	試験体厚さ	ライナー厚さ	損傷モード	衝突面のクレータ径	貫入量	ライナーの膨らみ径
4	80	0	貫通	140	80	
22	60	1.2	穿孔	90	60 (60)	300 46 (46)
25	80	1.2	膨らみ	110	42 (44)	200 10 (26)
28	100	1.2	貫入	130	33 (36)	150 0 (8)

表-5 解析パラメータ

単位kgf, cm, E=ヤング係数、 ν =ポアソン比、b=中心軸からの距離、 μ =摩擦係数

	パラメータ	値	備考		パラメータ	値
コ	ばね定数 K_n	$1.72 \times 10^9 \times 2\pi b$	$E = 2.3 \times 10^9$	ラ	ヤング係数	2.1×10^6
ン	ばね定数 K_s	$0.55 \times 10^9 \times 2\pi b$	$\nu = 0.17$	イ	ポアソン比	0.3
ク	ばね定数 K_θ	2.84×10^9	$2\pi EA$	ナ	降伏強度	4167
リ	圧縮強度 F_c	$96 \times 2\pi b$	$f_c = 240$	ル	破断歪み	26%
リ	引張強度 F_t	$8.83 \times 2\pi b$	$f_t = 20$	共	減衰定数	3%
ト	粘着力 C	$14.56 \times 2\pi b$	$f_s = 34.6$	通	時間刻み sec	0.2×10^{-6}
	内部摩擦角 ϕ	11.3°	$\mu = 0.2$		ステップ数	7500

図-8 解析モデル (No.4とNo.25試験体)

4.4 解析結果

実験結果と解析結果の比較を図-9に示す。また、表-4の中に解析によるクレータやライナーの膨らみの値を()で示した。No.4試験体に対する解析結果は、飛来物が完全に貫通し、No.22試験体はライナーに穿孔が生じて実験結果とほぼ一致した。破壊径は両ケースとも衝突面で解析の方がやや小さめとなったが、No.4の裏面の破壊径は、実験で17cmに対し、解析で22cmであった。No.22のライナーの膨らみは46mmであり、解析値と実験値は一致した。No.25試験体は、飛来物がコンクリート中に貫入し裏面のライナーが膨らんだ実験結果であり解析は良好にシミュレートしている。

いずれにおいても、解析結果の方が実験値に比べて衝突面でのクレータ径がやや小さく、ライナーの膨らみ変形がやや大きい、4つの解析結果は損傷モード、貫入量、ライナー変形などの現象を良く捉えていることが認められる。

図-9(a)と(c)を比較すると、厚さ80mmの試験体の裏面に1.2mm厚さの鋼製ライナーを取付けることにより、RC板の損傷の抑止効果が大きいことが解析結果からもわかる。

図-10は、飛来物の衝突後の速度の変化を示す。飛来物は0.15msecまではいずれの解析ケースとも一様に減速しているが、0.15msec以降はかなり差が生じていることがわかる。No.4のライナーの無い試験体の場合、飛来物の速度は0.35msec付近から一定の30m/secの速度で貫通していることがわかる。貫通後の速度、いわゆる残留速度を $Kar^{14)}$ の提案式で評価してみると42m/secとなり、

個別要素法による解析結果と比較的良好に対応している。ライナーを有し損傷が穿孔モードに至ったNo.22試験体は、0.23msecあたりから減速が小さくなって行くが、1.5msec時には10m/sec程度の速度を有している。No.25とNo.28の試験体では1.5msecで飛来物の速度がほぼ0になっており、飛来物は貫通しないことがわかる。

図-11にNo.25試験体における衝突中のエネルギーの

図-10 飛来物の速度時刻歴

図-11 エネルギーの時刻歴 (No.25試験体)

図-9 実験と解析による損傷比較

時刻歴変化を示す。運動エネルギーは、円盤要素の速度から求めた総和であり、コンクリートやライナーの歪みエネルギーは、要素のばね力と変位の積の総和であり、減衰エネルギーは、コンクリート要素の減衰力と変位の積の総和として求めた。飛来物の有していた運動エネルギーは大部分がコンクリート部分の歪みエネルギーに変換され、ライナーの歪みエネルギーは比較的少ないことがわかる。したがって、ライナーの効果は膜要素としての大変形状態での張力による抵抗作用が大きいものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、鋼製ライナーで補強したRC板の耐衝撃性を定量的に評価するために、コンクリート板厚および鋼製ライナーの厚さの相違がRC板の耐衝撃性に及ぼす影響について調べ、その結果に基づいて鋼製ライナーの効果を等価なコンクリート厚さに換算する評価式を提案した。また、その実験結果に対して個別要素法を用いた解析を行い、衝突実験において生じた各種の損傷モードを高い精度でシミュレートできることを示した。これらの結果をまとめると次の通りである。

- 1) 剛飛来物の高速衝突に対して、鋼製ライナーを裏面に取付けることにより、RC板の裏面のコンクリートの飛散を防止するとともに、貫通に対しても効果がある。衝突面に取付けた場合には、貫通や裏面剥離防止にはほとんど効果がない。
- 2) 局部破壊の大きさを減少させるために必要なコンクリート厚さは、鋼製ライナーの厚さの増加とともに減少する。
- 3) 本実験に用いた鋼製ライナー厚さの範囲での貫通限界、穿孔限界および膨らみ限界に対する等価なコンクリート厚さを評価する式を提案した。
- 4) 鋼製ライナー付きRC板の衝突実験結果に対して、ライナーを膜要素としてモデル化した個別要素法で解析した結果、実験での損傷状況を良好に捉えており、ライナーの裏面剥離や貫通の抑制効果を定量的に評価することが可能となった。

謝辞

本研究を進めるに当たり、防衛大学校の首藤誠志氏、鹿島の佐治秀一氏、小鹿紀英博士、小林伸浩氏、澤本佳和氏、鈴木篤氏にご協力をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Kar, A.K.: Projectile Penetration into Buried Structures, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.104, No.1, 1978.1
- 2) Degen, P.P.: Perforation of Reinforced Concrete Slabs by Rigid Missiles, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.106, No.7, pp.1623-1642, 1980.7
- 3) Chang, W.S.: Impact of Solid Missiles on Concrete Barriers, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.107, No.2, pp.257-271, 1981.2
- 4) Barr, P. et al.: Experimental Studies of the Impact Resistance of Steel Faced Concrete Composites, J-session, 7th-SMIRT, 1983.8
- 5) 岸徳光他: 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
- 6) Walter, T.A. et al.: Turbine Missile Perforation of Reinforced Concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.110, No.10, pp.2349-2455, 1984.10
- 7) Barr, P.: UKAEA Guidelines for the Design and Assessment of Concrete Structures Subjected to Impact-1987 Edition, 1987.1
- 8) Muto, K. et al.: Experimental Studies on Local Damage of Reinforced Concrete Structures by the Impacts of Deformable Missiles Part 1~4, J-Session, 10th-SMIRT, 1989.8
- 9) 森川博司他: 個別要素法を用いたコンクリートの破壊解析、日本建築学会構造系論文集、473号、pp.127-135, 1995.7
- 10) 土木学会: 構造物の衝撃挙動と設計法、構造工学シリーズ6、pp.60-61, 1994.1
- 11) 小谷俊介: 鉄筋コンクリートにおける載荷速度の影響、コンクリート工学、Vol.21, No.11, pp.23-34, 1983.11
- 12) 山口弘他: 高圧3軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係、日本建築学会構造系論文集、第396号、pp.50-59, 1989.2
- 13) 山口弘、藤本一男: 鉄筋コンクリート版の衝撃応答に及ぼすひずみ速度効果、日本建築学会構造系論文集、第406号、pp.25-35, 1989.12
- 14) Kar, A.K.: Impactive Effects of Tornado Missiles and Aircraft, Journal of the Structural Division, ASCE, vol.105, No.11, pp.2243-2260, 1979.11

(1995年3月10日原稿受理、1995年8月2日採用決定)