

ライナープレートの耐衝撃性評価に関する一考察

A study for evaluation of impact resistant performance of liner plates

安藤智啓*, 小林英昭**

Tomohiro Ando, Hideaki Kobayashi

*博 (工) 防衛省陸上装備研究所主任研究官 耐弾・耐爆構造研究室 (〒153-8630 東京都目黒区中目黒 2-2-1)

**博 (工) 防衛省陸上装備研究所技官 耐弾・耐爆構造研究室 (〒153-8630 東京都目黒区中目黒 2-2-1)

In this study, falling-weight impact tests for three kinds of liner plates were carried out to understand impact resistant performance of the plates and to establish its evaluation method. The impact resistant performance of the liner plates was investigated focusing on mid-span displacement waves, reaction force waves at supporting points and damage of their specimens. From this study, it is cleared that 1) the residual displacement (δ) of liner plate is proportional to an input impact energy (E), 2) the relation between its inclination (δ/E) and a static bending-capacity (P_y) of liner plate is in a high correlation, 3) the impact resistant performance of bending-failure type liner plate may be evaluated quantitatively using the residual displacement (δ) and the static bending-capacity (P_y).

Key Words: Liner plate, impact resistant performance, residual displacement, static bending-capacity

キーワード: ライナープレート, 耐衝撃性, 残留変位, 静的曲げ耐力

1. 緒言

2001年9月11日に米国で発生した航空機による衝突・爆破テロを契機として、我が国においても重要な鉄筋コンクリート (RC) 製構造物に対しては一定の耐爆性を確保し、不測の事態に備える必要性のあることが再認識されるようになった¹⁾。そして、RC 部材や RC 構造物を用いた爆発実験が、各研究機関で盛んに行われるようになった。著者らも、これまで RC 部材や RC 構造物を用いた爆発実験を行い、RC 板については裏面剥離 (スポール) の発生限界等が、板厚、爆薬量および爆発距離 (爆薬と RC 板との離隔距離) から予測可能な方法を提案した^{2),3)}。また、爆発荷重を受ける RC 部材および RC 構造物の応答や損傷が、ある程度の精度で予測できる数値シミュレーション方法を提示した⁴⁾⁶⁾。

一方、防衛施設について言えば、一定の耐爆性を確保することが要求される重要構造物として、上述の RC 製構造物の他に、ライナープレート⁷⁾と呼ばれる鋼製部材を主材に用いた可搬・組立式構造物⁸⁾がある。RC 製構造物は長期的な使用を目的とした構造物であるのに対して、可搬・組立式構造物は比較的短期的な使用を目的と

した構造物である。ライナープレートは、土木分野においても道路等覆工の横坑、下水道管等の立坑、橋脚等の仮設土留め材、集水井等の部材として一般的に使用されている。写真-1は、道路等覆工の横坑への使用例⁹⁾を示している。写真に示すように、実際の構造物は、ライナープレートをボルト等の結合部材により何枚も連結して構築している。ライナープレート単板は、波付けされた薄鋼板の四辺にフランジを取り付けた構造となっており、種類としては直線部材 (S 形)、円弧部材 (C 形)、直線部と円弧部から成る部材 (J 形) および矩形断面のコーナー部材 (L 形) の4種類¹⁰⁾がある。いずれも、JIS G 3101「一般構造用圧延鋼材」に規定される SS330 材を使用している。各々の部材に対して、2.7 mm~7.0 mm の範囲で7種類の板厚のものが規格化されており、いずれも一般に市販されている。

ライナープレートの設計法に関しては、静的荷重に対してはコルゲート・ライナー技術協会が既にマニュアルを策定している¹⁰⁾。しかしながら、爆発荷重あるいは衝撃荷重に対しては土木分野ではさることながら、防衛分野でもマニュアルが策定されていないところである。しかも、ライナープレートの耐爆性や耐衝撃性も、これま



写真－１ 道路等覆工の横坑への使用例

で体系的な検討が行われてこなかったこともあり、詳細には明らかになっていないのが現状である。

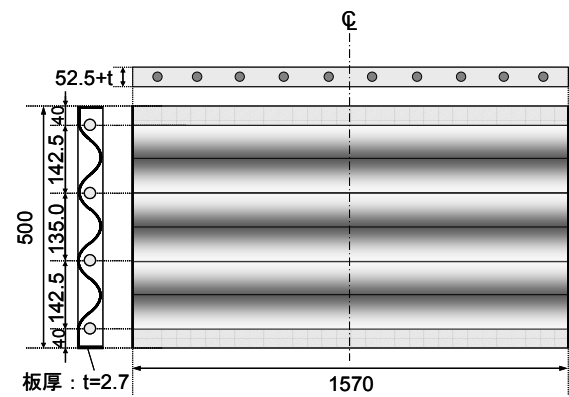
一方、鋼製構造物の耐衝撃設計法に関する国内の研究については、鋼製砂防構造物の研究^{11),12)}、橋梁用鋼製防護柵の研究¹³⁾、鋼製ロックシェッドの研究¹⁴⁾等がある。いずれも、対象とする構造物に対する衝撃実験あるいは数値シミュレーションの実施により所要のデータを取得し、各々の対象構造物の設計法や耐衝撃性について論じている。さらに、諸外国ではライナープレートに形状がより近い鋼板に対する耐爆性や耐衝撃性に関する研究も行われている。例えば、建物に対する耐爆用途としての鋼板の研究^{15),16)}や、海洋構造物に関する鋼製耐爆壁の研究^{17),18)}等がある。これらも、爆発実験（衝撃実験を含む）や数値シミュレーションを行うことにより所要のデータを取得し、耐爆性・耐衝撃性について論じている。

本研究では、第一段階として室内レベルでの実験が容易に実施可能な重錘落下方式による衝撃問題に着目し、かつライナープレートの中でも最も頻繁に使用される直線部材と円弧部材に着目して、衝撃エネルギーを受けるこれらライナープレート単板の耐衝撃性を明らかにするための衝撃実験を行った。また、実験結果を分析し、ライナープレートの耐衝撃性評価が可能な方法の確立に資するための検討も実施した。なお、ライナープレートの耐衝撃性は、岸ら¹⁹⁾の鉄筋コンクリートはりの場合の検討を参考に、部材の変位、支点反力および損傷状況に着目して検討した。

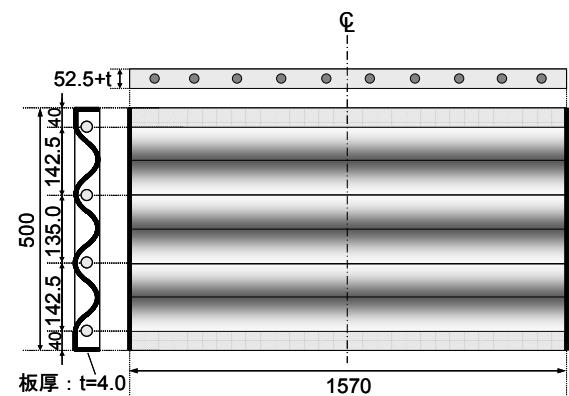
2. 衝撃実験の概要

2.1 ライナープレート

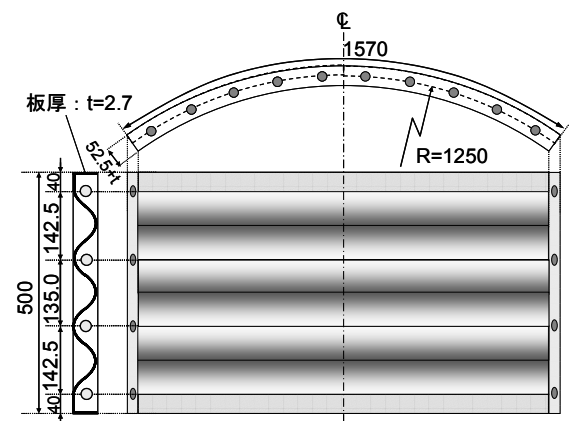
本実験では、直線部材および円弧部材のうち、使用頻度の極めて高い代表的なライナープレートを３種類選定した。図－１(a)～(c)に、本実験に用いたライナープレートの形状寸法を示す。(a)図および(b)図は直線部材（各々LP-A試験体、LP-B試験体）、(c)図は円弧部材（LP-C試験体）である。(a)図と(b)図は、部材の板厚のみ異なっ



(a) LP-A（直線部材；板厚 2.7 mm）



(b) LP-B（直線部材；板厚 4.0 mm）



(c) LP-C（円弧部材；板厚 2.7 mm）

図－１ ライナープレートの形状寸法（単位：mm）

表－１ ライナープレートの静的材料特性値

種類	降伏応力 (MPa)	引張応力 (MPa)	伸び (%)
LP-A	267	361	41
LP-B	295	359	41
LP-C	267	361	41

ている。前者が板厚 2.7 mm、後者が板厚 4.0 mm である。(c)図の円弧部材は、板厚 2.7 mm である。なお、表－１に、本ライナープレートの静的な材料特性値を一覧に示

(a) LP-A (直線部材; 板厚 2.7 mm) の場合

(b) LP-C (円弧部材；板厚 2.7 mm) の場合

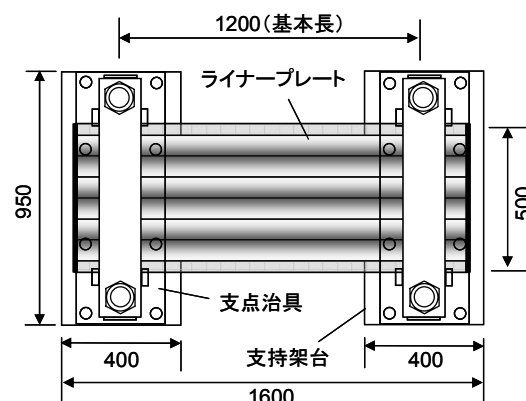
写真-2 ライナープレートの設置状況

す。これらの特性値は、実験に用いたライナープレートと同様のものを各々1枚ずつ準備し、各ライナープレートから削り出したそれぞれの試験片に対して引張試験を行って取得した値である。

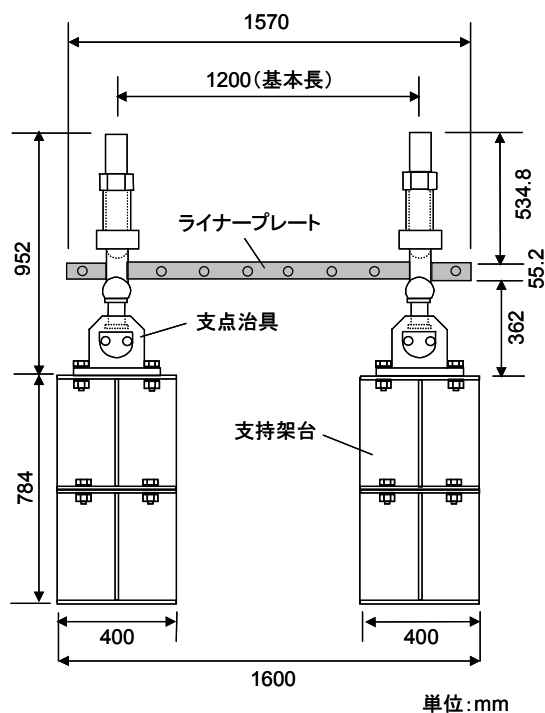
2.2 実験方法

衝撃実験は、本研究室で所有しているショックタワー式高速度破壊装置²⁰⁾を用いて、陸上装備研究所相模原地区で行った。写真-2(a)および(b)は、衝撃実験におけるライナープレートの設置状況を示したものである。(a)図が直線部材であるLP-A試験体(板厚2.7mm)を用いた場合で、(b)図が円弧部材であるLP-C試験体(板厚2.7mm)を用いた場合である。なお、図-2には、LP-A試験体の場合を例に、ライナープレート、支点治具および支持架台の形状寸法を示している。

写真および図のとおり、いずれの場合も、ライナープレートは支点反力測定用のロードセルが片側に3個ずつ組み込まれた鋼製の支点治具の支持部上に設置している。なお、LP-C 試験体の場合には、ライナープレートと支点治具が直交するよう対処するため、治具回転部を鉛直方向に対して 27.5° 傾けている。また、部材の支点部上縁には、跳ね上がりを防止するためのストッパーが設置されている。支点間のライナープレートの長さは、部材の種類によらず 1.2 m を基本とした。後述するが、直線部材である LP-A, LP-B 試験体の場合には、1.4 m の長さも設定した。支点治具全体は、治具回転部の中心で回転が可能な構造となっている。支持架台は、試験施設内のカウンターマス²⁰⁾と呼ばれる基礎の上に固定している。衝撃実験は、質量 125 kg の鋼製重錘を所定の高さまで吊り上げ、部材のスパン中央部に一度だけ自由落下させる単一載荷方法により行った。重錘は先端部直径が 155 mm の円柱形状のものである。重錘の先端部は平坦であるが、重錘は発射管内を垂直な姿勢を保持して落下する構造となっているため、部材に対して特に斜めに衝突するような肩当りは発生しない。



(a) 上面图



(b) 正面図

図-2 ライナープレート、支点治具および支持架
台の形状寸法（LP-A の場合の例）

支点間のライナープレートの長さが 1.2 m の場合には、実験時にライナープレートのスパン中央部における幅中心位置（下側が凸の部分）の変位波形および支点部に発生する支点反力波形を計測した。変位波形の測定には、ストローク±100 mm で最大応答周波数 915 Hz のレーザ式変位計を用いた。支点反力波形の測定には、容量 250 kN/個、最大応答周波数 2.4 kHz の起歪柱型のロードセルを用いた。ここで、支点反力とは、各々のロードセルから得られた力を合算した力をいう。また、アンプおよび記録装置には、それぞれ KYOWA 社製の CDV-700 (最大応答周波数：500 kHz)、EDX-2000A (最大サンプリング周波数：200 kHz)を用いた。データのサンプリングタイムは 20 μ s とし、計測時にフィルター処理は特に施さなかった。計測終了後、支点反力波形はノイズ除去のため、5 点の矩形移動平均を施し平滑化処理を行った。なお、実験終了後には、実験に用いた全てのライナープレートの損傷状況を写真に記録するとともに、ライナープレートのスパン中央部の残留変位をノギスを用いて計測した。ノギスによる計測結果は、後述する変位波形の残留成分にほぼ対応していることを確認している。

2.3 実験ケース

表 2 に本実験ケースを示す。ケース 1～5 は、各々 LP-A 試験体、LP-B 試験体および LP-C 試験体を用いた実験ケースである。最初に、ケース 1～3 について言及すると、これらの実験は全て支点間のライナープレートの長さが 1.2 m の条件の下、3 種類の重錘の衝突速度を与えて実施している。ここで衝突速度は、衝突時に生じるライナープレートの最大変位量が用いた変位計の容量 (±100 mm) を超えないように、かつ入力衝撃エネルギーでみた場合に、3 つのエネルギー値が概ね等間隔に並ぶように配慮して決めた。ただし、ケース 3 については、支点治具を斜めに傾けた実験条件であることから、衝突速度は実験時の安全性に配慮してケース 1 および 2 の場合よりも若干小さく設定した。なお、実験の再現性を確認するために、実験は各ケースのそれぞれの衝突速度に対して 2 回ずつ実施している。

次に、ケース 4、5 について述べると、実験終了後のライナープレートのスパン中央部における残留変位のみ計測することを目的として、実験は支点間のライナープレートの長さが 1.4 m の条件の下、1 種類の衝突速度で行っている。また、試験体数の都合により同条件の実験は 1 回のみとしている。

3. 実験結果

3.1 変位波形

図 3 は、ケース 1～3 の各衝突速度におけるスパン中央部の変位波形を示したものである。各々の図中には、2 回の同条件の実験から得られた波形を併せて示して

表 2 実験ケース

実験 ケース	ライナープレートの種類	重錘の衝突速度 V (m/s)	入力衝撃エネルギー ^{※1} E (kJ)
ケース 1	LP-A (直線部材； 板厚 2.7 mm)	0.9	0.051
		4.6	1.323
		6.5	2.641
ケース 2	LP-B (直線部材； 板厚 4.0 mm)	0.9	0.051
		4.6	1.323
		6.5	2.641
ケース 3	LP-C (円弧部材； 板厚 2.7 mm)	0.8	0.040
		3.8	0.903
		5.4	1.820
ケース 4 ^{※2}	ケース 1 に同じ	6.5	2.641
ケース 5 ^{※2}	ケース 2 に同じ	6.5	2.641

※1 入力衝撃エネルギー E(kJ)は、重錘質量 125(kg)に表中の V(m/s)の値の二乗を乗じて 2 で除して算出している。

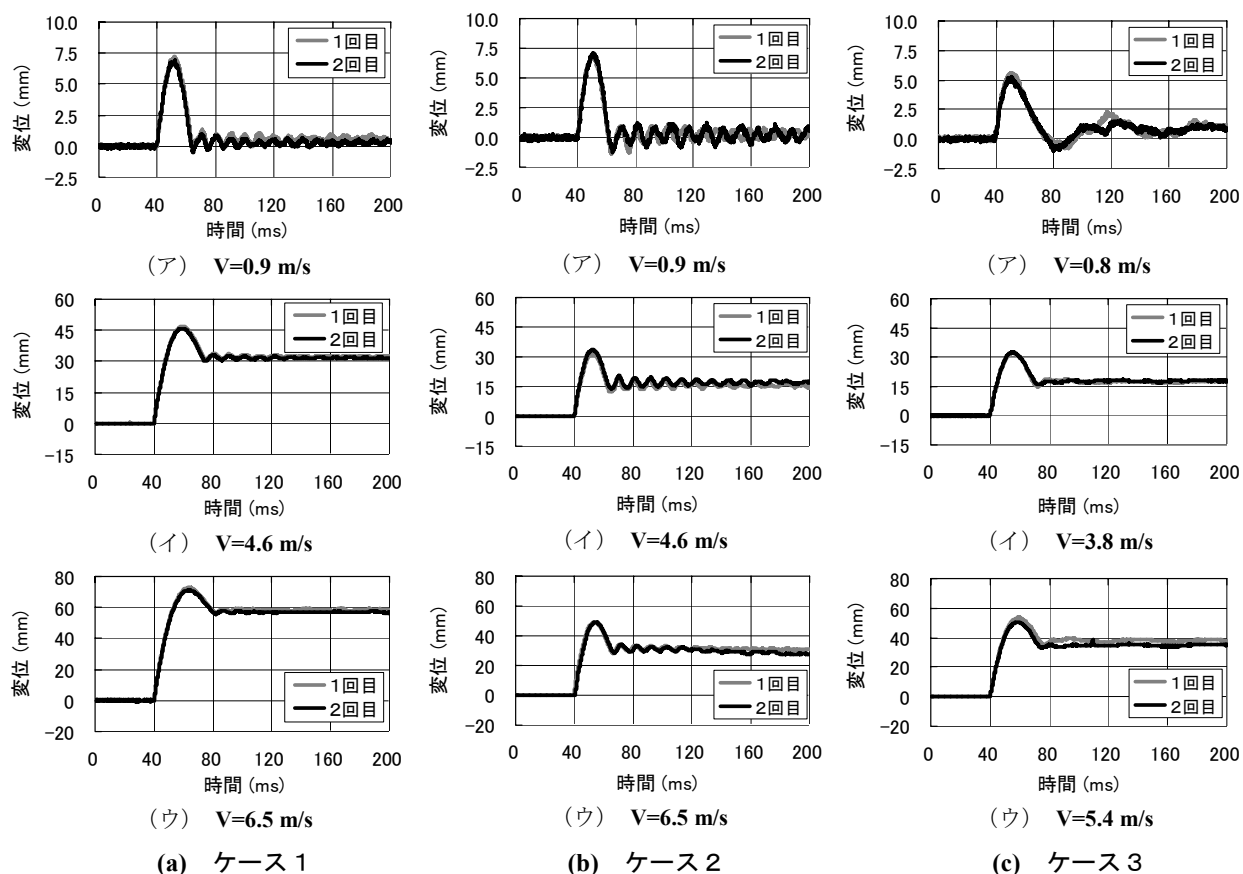
※2 支点間のライナープレートの長さを 1.4 m としたケースである。他は全て 1.2 m (基本長) である。

いる。また、図中の横軸の時間は、重錘がライナープレートに衝突した時間を 40 ms として 200 ms まで取って整理している。これは、以降に述べる支点反力波形の場合も同様とした。

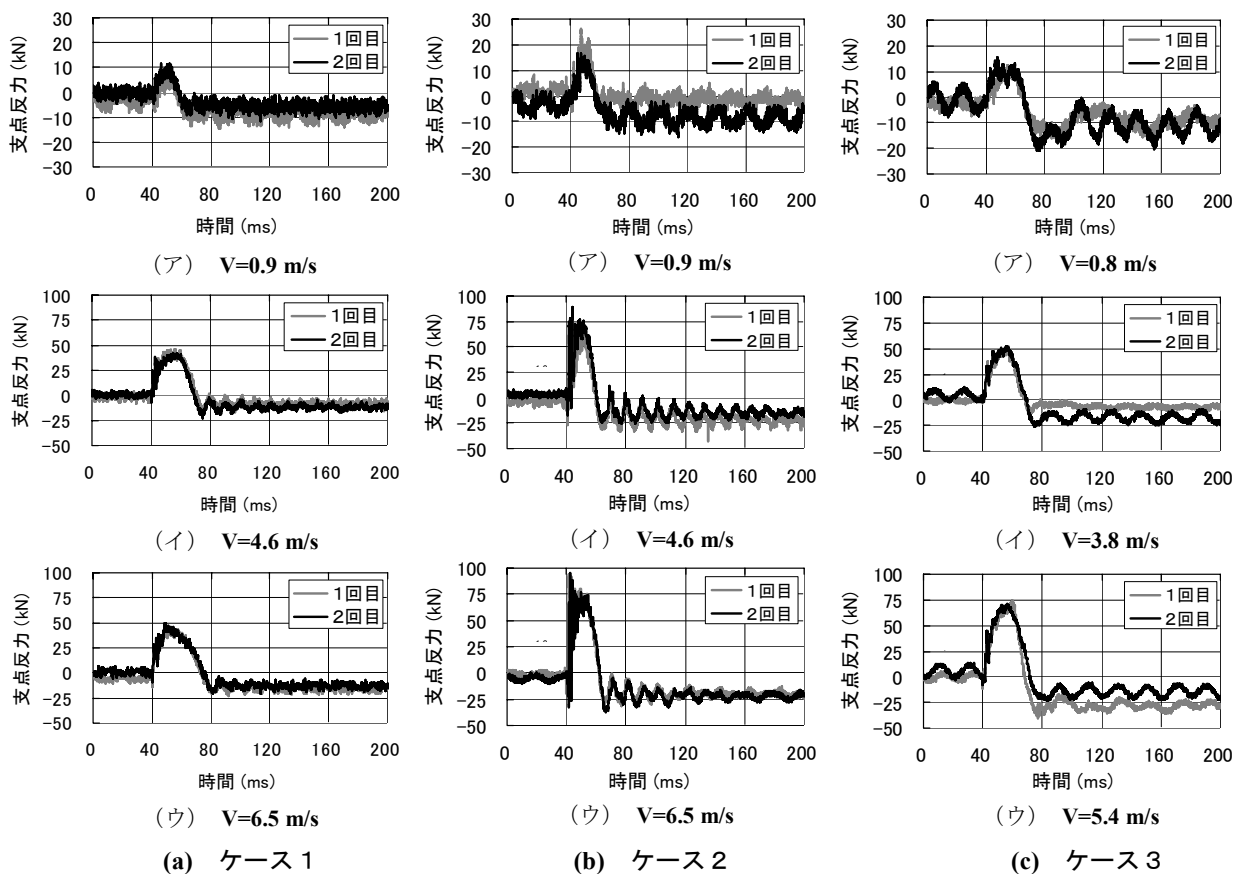
図より、実験ケースおよび衝突速度によらず、1 回目と 2 回目の変位波形は両者でほぼ同様の分布となっていることが認められる。これは、本衝撃実験の再現性が高いことを意味している。波形の詳細をみると、いずれの場合も、波形は正弦波状の半波を呈した後、一定の残留変位を有した状態で自由振動している様子が認められる。また、初期の半波で発生する最大変位およびその後の残留変位が、各ケースとも衝突速度の増大とともに大きくなっていることも確認できる。さらに、初期の半波の継続時間が、衝突速度の増大に伴い長くなっている様子も認められる。これは、衝突速度の増大とともにライナープレートの塑性化の度合いが著しくなったためと考えられる。

3.2 支点反力波形

図 4 は、同じくケース 1～3 の各衝突速度における支点反力波形を示している。ここでも、各々の図中には、2 回の同条件の実験から得られた波形を併せて示している。図より、ケース 2 の V=0.9 m/s、ケース 3 の V=3.8 m/s および V=5.4 m/s の約 70 ms 以降の波形分布を除き、ここでも実験ケースおよび衝突速度によらず、1 回目と 2 回目の支点反力波形は両者でほぼ同様の分布となっていることが認められる。波形の詳細をみると、支点反力波形は、いずれの場合も変位波形に類似した正弦波状の半波を呈した後、負側に推移した状態で持続している様子が認められる。反力が負側に移行する理由は、跳ね返り防



図－3 スパン中央部の変位波形



図－4 支点反力波形

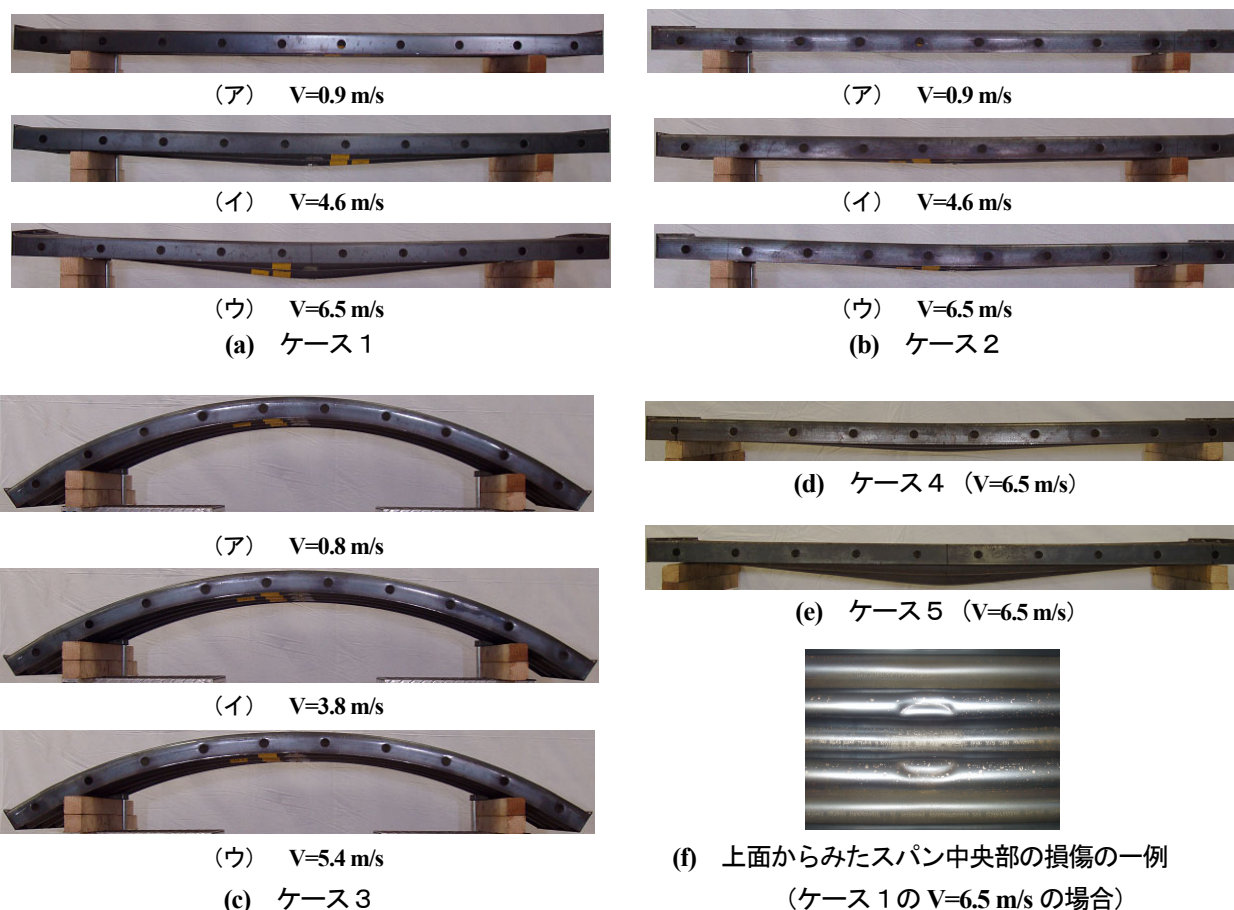


写真-3 実験終了後のライナープレートの損傷状況

止用のストッパーを設置する際に、このストッパーを大型の六角ボルトによりライナープレートおよびロードセルに対して垂直に締め付け、かつこの状態で各ロードセルの力を零点に設定しており、重錘落下時の衝撃によってこの締め付け力の解放された分の力が負の成分として現れたためと考えられる。

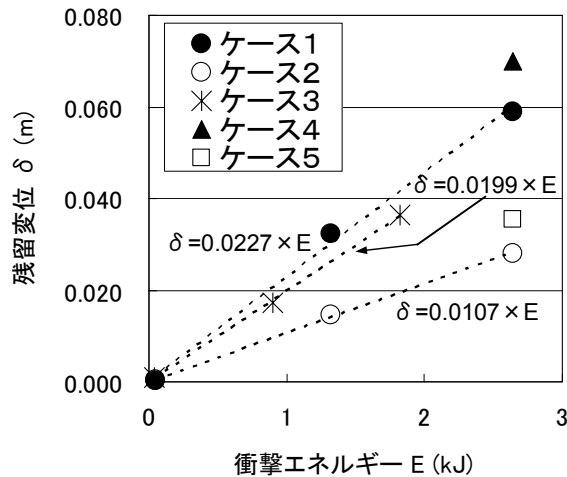
また、支点反力の場合には、変位波形の場合と異なり、衝突速度の増加に伴う最大支点反力の明確な増大が認められないケースがある。すなわち、ケース1および2の場合には、衝突速度 $V=4.6$ m/sと $V=6.5$ m/sの最大支点反力がほぼ同程度になっている。また、ケース3の場合にも、後述の図-6からも分かるように、 $V=3.8$ m/sから $V=5.4$ m/sへの最大支点反力の増分は、 $V=0.8$ m/sから $V=3.8$ m/sの増分に比べて小さくなっている。これは、RC構造物による衝撃現象²¹⁾においてみられた傾向に類似している。しかしながら、初期の半波の継続時間は、変位波形の場合と同様に衝突速度の増大に伴い長くなっている。

3.3 損傷状況

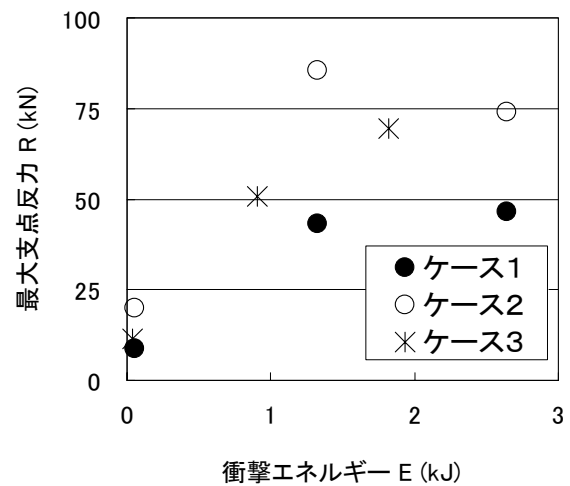
写真-3(a)~(c)は、同じくケース1~3の各衝突速度における実験終了後のライナープレートの損傷状況を示している。ここでは、本衝撃実験の再現性が高かったことを鑑みて、1回目の実験の損傷状況のみを代表させて

示している。また、写真-3(d), (e)はケース4および5の実験終了後のライナープレートの損傷状況を、写真-3(f)はライナープレート上面からみたスパン中央部の重錘衝突に伴う局部損傷の一例（ケース1の衝突速度 $V=6.5$ m/sの場合）を示している。

(a)~(c)の写真より、いずれのケースにおいても、ライナープレートの残留変位は衝突速度の増加に伴い大きくなっている様子が認められる。また、その量はスパン中央部で最も大きく、支点部に向かうに従って小さくなっている様子も確認できる。さらに、(d), (e)に示すケース4および5においても、残留変位はスパン中央部で最も大きく、支点部に近づくに従って徐々に小さくなる性状を示していることがみてとれる。これより、本ライナープレートは、(f)に示されるようにライナープレートのスパン中央部に若干のへこみが生じるものの、全体的には曲げの変形モードが卓越した状態で損傷しているものと判断される。なお、本実験に用いた装置の構造上、ライナープレート中央部の全幅に対して直接の衝撃力は作用しないが、二辺支持の実験条件も相まって、ライナープレートはいずれのケースでもスパン中央部で角折れする損傷が支配的であり、全体的には梁に近い曲げ変形を呈していると思われる。



図－5 残留変位と衝撃エネルギーの関係



図－6 最大支点反力と衝撃エネルギーの関係

3.4 残留変位－衝撃エネルギー関係および最大支点反力－衝撃エネルギー関係

本節では、ライナープレートの耐衝撃性について検討する。検討は、文献19)を参考に、各ライナープレートに対して縦軸にライナープレートのスパン中央部の残留変位 δ および支点部に発生する最大支点反力 R を取り、横軸に衝撃エネルギー E を取って行う。なお、変位に関しては、最大応答変位で整理する方法も考えられるが、ここでは文献19)にならい、実験終了後でも計測することが可能な残留変位に着目して整理することとした。

図－5は、ライナープレートの残留変位と衝撃エネルギーの関係を示している。図中、各ケースのそれぞれの衝撃エネルギーにおけるプロット値は、実験終了後に計測したライナープレート中央部の残留変位を示している。また、ケース1～3については、実験誤差の影響をなるべく小さくして検討することを考慮して、同条件の結果を平均して示している。図より、ケース1～3についてみると、実験ケースによらず、残留変位は衝撃エネルギーの増加とともに線形的に増大していることが分かる。図中の各破線は、残留変位と衝撃エネルギーの関係を最小二乗法により直線近似した結果である。また、図中の数値は、各直線の勾配を表している。この勾配を α とすると、残留変位 δ と衝撃エネルギー E の関係は式(1)で与えられる。

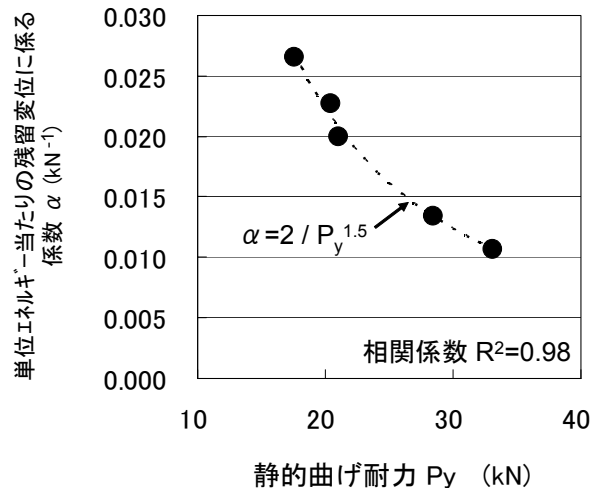
$$\delta = \alpha \times E \quad (1)$$

ここで、 δ は残留変位 (m)、 E は衝撃エネルギー (kJ) および α は単位エネルギー当たりの残留変位に係る係数 (kN^{-1}) である。なお、ケース1～3の結果を踏まえ、ケース4およびケース5の α を各々のプロット値と原点をとる直線として求めると、それぞれ $\alpha=0.0265$ (ケース4の場合)、 $\alpha=0.0134$ (ケース5の場合)と算出される。

図－6は、ライナープレートの最大支点反力と衝撃エネルギーの関係を示している。図中のプロット値は、ここでも実験誤差の影響をなるべく少なくすることを目的として、同条件の実験波形を単純に加算して2で除した平均波形の最大値で示している。なお、ケース4、5については、応答波形を計測していないことより示していない。図より、いずれの実験ケースについても、最大支点反力は衝撃エネルギーと線形的な関係にはないことが分かる。特に、ケース2の場合には、最も大きい衝撃エネルギーにおける最大支点反力は、一段小さい衝撃エネルギーのそれよりむしろ若干小さく示されていることがみて取れる。これは、支点部に作用する反力がライナープレートを介して伝達されることを踏まえると、ライナープレートが動的耐力に近づくとき支点部に作用する力も入力される衝撃エネルギーに比例して増大しなくなることに対応しているものと考えられる。いずれにしても、このように最大支点反力と衝撃エネルギーの関係は線形関係にないため、定式化の可能性も含めて両者の関係を把握するためには、更なる実験データの蓄積が必要であると考えられる。

3.5 ライナープレートの耐衝撃性評価の方法

本節では、ライナープレートの耐衝撃性評価の方法について検討する。前節の検討より、ライナープレートのスパン中央部の残留変位 δ と衝撃エネルギー E の関係は式(1)で与えられることが分かった。ここで、さらに、式(1)中の単位エネルギー当たりの残留変位に係る係数 α が、形状や板厚が任意のライナープレートに対して統一的な指標を用いて算出されるならば、ライナープレートの耐衝撃性評価も残留変位を規定することで実施可能になると考えられる。そこで、3.3節において本実験におけるライナープレートの損傷が曲げ卓越型であったことから、岸ら¹⁹⁾の研究を参考に、ライナープレートの静的曲げ耐力に着目して、縦軸に α (kN^{-1})を、横軸に静的曲



図－７ 単位エネルギー当たりの残留変位に係る係数と静的曲げ耐力の関係

げ耐力 P_y (kN)を取って両者の関係を調べることとした。

各ライナープレートの静的曲げ耐力 P_y は、最初に式(2)より部材の曲げモーメント M を算出し、次に算出した曲げモーメントを例えば直線部材の場合には式(3)に代入して求めた。

$$\sigma = (M \times y) / I \quad (2)$$

$$P_y = (4 \times M) / (1000 \times L) \quad (3)$$

ここで、 σ は曲げ応力度(N/mm^2)、 M は曲げモーメント($\text{N} \cdot \text{mm}$)、 y は中立軸から部材下面の凸部表面までの距離(mm)および I は断面二次モーメント(mm^4)である。また、 P_y は静的曲げ耐力(kN)、 L は支点間の距離(mm)である。式(2)中の σ は表－１中の降伏応力 σ_y で与え、 I と y は文献10)の値で与えた。すなわち、 I はLP-AとLP-C試験体に対して $7.05 \times 10^5 (\text{mm}^4)$ 、LP-B試験体に対して $1.05 \times 10^6 (\text{mm}^4)$ を与えた。また、 y はLP-AとLP-C試験体に対して $30.65 (\text{mm})$ で与え、LP-B試験体に対して $31.15 (\text{mm})$ で与えた。なお、LP-C試験体を用いたケース3については、ライナープレートと支点治具を二次元の有限要素梁モデルとして簡易にモデル化して、AUTODYN^{(22), (23)}と呼ばれるソフトウェアに装備されている擬似静的解析ツールを利用して所要の静的曲げ耐力を求めた。ケース1、2、3、4および5の静的曲げ耐力は、各々20.5 (kN)、33.1 (kN)、21.0 (kN)、17.5 (kN)および28.4 (kN)である。

図－7は、ケース1～5の単位エネルギー当たりの残留変位に係る係数とライナープレートの静的曲げ耐力の関係を示している。図中、ケース4およびケース5の単位エネルギー当たりの残留変位に係る係数 α の値は、前述したとおりそれぞれ $\alpha=0.0265$ 、 $\alpha=0.0134$ で与えている。図より、 α は静的曲げ耐力 P_y の増加に伴い減少して

いることが分かる。図中、破線は全プロット点を最小二乗法により曲線近似した結果である。この曲線は式(4)で表され、各々の関係には高い相関のあることが認められる。なお、本研究の範囲では、円弧部材についても直線部材と同様の $\alpha-P_y$ の曲線上にのることが示されているが、円弧部材に関しては今後データを増やしてさらに詳しく調べていきたいと考えている。

$$\alpha = 2 / P_y^{1.5} \quad (4)$$

ここで、 α は単位エネルギー当たりの残留変位に係る係数 (kN^{-1})および P_y は静的曲げ耐力 (kN)である。

次に、式(4)を式(1)に代入して整理すると、式(5)が得られる。

$$E = (\delta \times P_y^{1.5}) / 2 \quad (5)$$

ここで、 E は衝撃エネルギー (kJ)、 δ は残留変位 (m)および P_y は静的曲げ耐力 (kN)である。式(5)は、ライナープレートの限界状態を残留変位で規定することにより、ライナープレートの種類に応じて、各部材が抗たんする限界の衝撃エネルギーが評価できる式になっており、損傷が曲げ卓越型となるライナープレートの耐衝撃性評価が可能になっている。ただし、式(5)中の数値パラメータについては現段階では実験数も少なく、その信頼性についてはまだ検討の余地があると考えている。

4. まとめ

本研究では、第一段階として室内レベルでの実験が容易に実施可能な重錘落下方式による衝撃問題に着目し、かつライナープレートの中でも最も頻繁に使用される直線部材と円弧部材に着目して、衝撃エネルギーを受け

るこれらライナープレート単板の耐衝撃性を明らかにするための衝撃実験を行った。また、実験結果を分析し、ライナープレートの耐衝撃性評価が可能な方法の確立に資するための検討も実施した。本研究の範囲内から得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) ライナープレートの残留変位(δ)と入力衝撃エネルギー(E)は線形関係にある。
- (2) ライナープレートの支点部に生じる最大支点反力(R)と入力衝撃エネルギー(E)は線形関係にない。
- (3) 残留変位と入力衝撃エネルギーの勾配(δ/E)は、静的曲げ耐力(P_y)と高い相関関係にある。
- (4) 損傷が曲げ卓越型となるライナープレートの耐衝撃性は、ライナープレートの残留変位(δ)および静的曲げ耐力(P_y)を用いて評価できる可能性がある。

今後、実験ケースを増やして信頼性の高い評価式の構築を図るとともに、さらに大きい衝撃エネルギーが作用する場合についても同様の検討を行いたいと考えている。また、ライナープレートが爆発エネルギーを受ける場合に関しても、本研究と同様な方法による耐衝撃性評価が可能かどうかを検討したいと考えている。

謝辞

本研究を取りまとめるにあたり、防衛省陸上装備研究所耐弾・耐爆構造研究室長の柳井知宏氏、同省技術研究本部研究開発評価官評価管理官の山田順一氏、同省艦艇装備研究所構造強度研究室技官の深沢幸士郎氏および同省陸上装備研究所残存性解析研究室主任研究官の阿曾沼剛氏には有益なご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション：テロにも負けないインフラ施設, pp.38-61, 2002.2.
- 2) 森下政浩, 田中秀明, 安藤智啓, 萩谷浩之：接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼすコンクリート強度及び鉄筋間隔の影響, コンクリート工学論文集, 第15巻第2号, pp.89-98, 2004.5.
- 3) 森下政浩, 阿曾沼剛, 栗木茂幸, 竹本憲介, 齋藤和伸, 松尾啓：近接爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷と覆土の緩衝効果, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, pp.865-876, 2006.10.
- 4) 安藤智啓, 森下政浩, 阿曾沼剛, 松尾啓：近接爆発荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの応答に関する三次元数値解析, コンクリート工学論文集, 第18巻第1号, pp.21-32, 2007.1.
- 5) 安藤智啓, 齋藤和伸：爆発荷重を受ける RC はりの応答に与える材料モデルの影響に関する解析的研究, 土木学会構造工学論文集 Vol.53A, pp.1261-1272, 2007.3.
- 6) 安藤智啓：爆薬要素のモデル化が鉄筋コンクリート構

造物の爆発応答特性に与える影響, 土木学会構造工学論文集 Vol.54A, pp.999-1010, 2008.3.

- 7) 神田大, 小泉淳：ライナープレートの標準的な設計法に関する研究, トンネル工学研究論文・報告集第9巻, pp.63-70, 1999.11.
- 8) 安藤智啓：衝撃荷重を受ける可搬・組立式構造部材の損傷評価シミュレーション, (財)防衛技術協会 防衛技術ジャーナル, pp.38-45, 2008.6.
- 9) <http://www.okasanlivic.co.jp/materials/linerplate.html>
- 10) (社)鋼材倶楽部「ライナープレート設計・施工マニュアル作成委員会」：ライナープレート設計・施工マニュアル, コルゲート・ライナー技術協会, 2000.6.
- 11) 石川信隆：鋼製砂防構造物の耐衝撃設計法について, 土木学会第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.277-284, 1998.6.
- 12) 白石博文, 梶田幸秀, 香月智, 石川信隆, 松村和樹, 嶋丈示：礫衝突による損傷を受けた中空鋼管の残存耐力評価実験, 土木学会構造工学論文集 Vol.48A, pp.1505-1512, 2002.3.
- 13) 伊藤義人, 劉斌, 宇佐見康一, 草間竜一, 貝沼重信：車両衝突を受ける橋梁用鋼製防護柵の材料ひずみ速度効果と性能照査に関する研究, 土木学会論文集 No.759/I-67, pp.337-353, 2004.4.
- 14) 構造工学シリーズ8 ロックシェッドの耐衝撃設計, 土木学会, pp.162-166, 1998.11.
- 15) Michael B. Gott, Alan J. Watson: The Peterborough explosion - An analytical case study, Proceedings of the 8th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, pp.579-588, 1997.4.
- 16) Youguang Pan, Maurice N. B. Diangha, Alan J. Watson, Brian Hobbs: Experimental study of a cladding fixing assembly to impact loading, Proceedings of the 8th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, pp.1133-1140, 1997.4.
- 17) Youguang Pan, Luke A. Louca: Experimental and numerical studies on the response of stiffened plates subjected to gas explosions, Journal of Constructional Steel Research 52, pp.171-193, 1999.
- 18) Y. H. Liang, L. A. Louca, R. E. Hobbs: Corrugated panels under dynamic loads, International Journal of Impact Engineering 34, pp.1185-1201, 2007.
- 19) 岸徳光, 三上浩：衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案, 土木学会構造工学論文集, Vol.53A, pp.1251-1260, 2007.3.
- 20) 構造工学シリーズ6 構造物の衝撃挙動と設計法, 土木学会, pp.37-38, 1993.12.
- 21) 岸徳光, 今野久志, 三上浩, 岡田慎哉：大型 RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案, 土木学会構造工学論文集 Vol.54A, pp.1077-1088, 2008.3.

- 22)Autodyn. Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software: Theory Manual, Century Dynamics Limited, 1999.
- 23)<http://www.engineering-eye.com/AUTODYN/index.html>

(2008 年 9 月 18 日受付)