

## 鋼構造建物の発破解体に用いる成形爆薬の有効な形状と 鋼板の衝撃破壊に関する研究

加藤政利\*, 中村雄治\*\*, 松尾 彰\*\*, 緒方雄二\*\*\*  
 勝山邦久\*\*\*, 橋爪 清\*\*\*\*

耐用年数を迎えた鋼構造建物の解体工事において、発破解体法は有効な手法であると考えられる。この鋼構造建物を安全かつ確実に倒壊制御するためには、目的に応じた必要最小限の爆薬量を実験的に把握するとともに、成形爆薬による鋼材の衝撃破壊メカニズムを解明する必要がある。そこで、本研究では、成形爆薬を用いた鋼材の動的な破壊現象を把握するための基礎的研究として、ライナー材の材質、爆薬の形状係数、ライナー角およびスタンドオフを変化させた成形爆薬を準備し、少ない爆薬量で鋼材の切断に効果的な爆薬成形条件を実験的に検証した。また、成形爆薬による鋼材の衝撃破壊メカニズムは、これまでモンロー効果で説明されてきたが、高速度カメラを用いた写真撮影と爆速計測の実施および鋼材の塑性変形性状から、モンロー効果だけでは説明のつかない鋼材の切断挙動があることを見出し、それについても考察を行った。

### 1. 緒 言

これまでに国内で建設された建築物の内、戦後の復興建物や高度成長期(1960年代の東京オリンピック～大阪万国博覧会頃)に建設された建物の多くが耐用年数を迎えようとしている。これらの建物を短期間に効率よく解体する方法として、火薬類を用いた発破解体法が有効な手法であると考えられる。しかし、我が国の建物は、厳しい耐震設計法に基づいた耐力と変形性能の確保のため、構造躯体に要求される鋼材量が多く、また、隣接する建物の間隔も狭いことから、諸外

国で頻繁に行われているような発破解体を実現させることは難しい。そのため、基礎的な研究を無視した無理な発破解体作業を行うことは、周辺建物への二次的被害や人的災害を招く可能性が高く、また、早期解体、早期建設に不可欠な工期短縮も望めない。

そこで、そのための基礎的研究の第1歩として、様々な建築構造種別の中で最も普及しており、その要素技術が橋梁、船舶等の解体分野に应用可能な鋼構造建物に着目した。この鋼構造建物の発破法による解体を実現するためには、発破開始から建物の倒壊に到るまでの鋼構造建物の発破解体シミュレーション法<sup>3)</sup>を確立するとともに、目的に応じた必要最小限の爆薬量を実験的に把握した鋼構造建物の発破解体に関する設計手法を確立しなければならない。

著者等は、これまでに鋼構造建物を構成する部材の切断・切除に効果的な成形爆薬の形状、寸法、材質等の条件を把握する実験を実施し、有効な爆薬成形条件<sup>1,2)</sup>を得ようとしている。また、成形爆薬による鋼材の衝撃破壊メカニズムを構造学的に解明する一手法として、実験終了後の鋼板の切断面および鋼板の塑性変形を観察すると、ライナーカッター(起爆終了後の金属ライナーを示し、鋼板の切断に大きく寄与しているもの)が鋼板の切断に寄与した痕跡が見られた。この現象は、文献<sup>6~8)</sup>で知られるモンロー効果と異なる現象である。

1998年7月3日受理

\* 五洋建設株式会社

〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8

TEL 03-3817-7557

FAX 03-3816-7508

\*\* 広島大学工学部建設構造工学

〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1

TEL 0824-24-7799

FAX 0824-24-7799

\*\*\* 通商産業省工業技術院資源環境技術総合研究所

〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-3

TEL 0298-58-8564

FAX 0298-58-8558

\*\*\*\* 日本化薬株式会社化学品事業本部火薬事業部

〒102-8172 東京都千代田区富士見1-11-2

東京富士見ビル

TEL 03-3237-5361

FAX 03-3237-5088

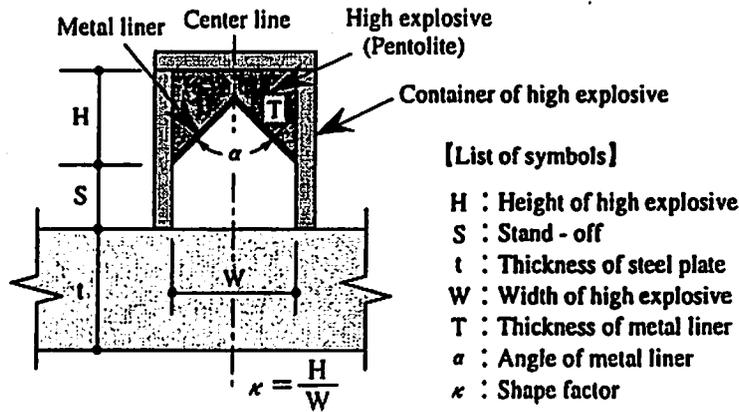


Fig. 1 Layout of shaped charge

Table 1 Mechanical properties of materials

Material	t (mm)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	YR (%)	EL (%)	HRB
SS400	19	257	421	60.9	32	69
SM490A	38	334	517	64.6	32	99

t: Thickness of steel plates,  $\sigma_y$ : Yield point,  $\sigma_u$ : Ultimate strength, YR: Yield ratio, EL: Elongation, HRB: Rockwell hardness (Scale B)

そこで本研究では、これまでに実施した実験結果を基に、成形爆薬の爆薬成形条件と鋼板の切断効果との関係を考察することにした。また、高速度カメラを用いた写真撮影と爆速計測の実施および実験終了後の鋼板の塑性変形状から、ライナーカッターが鋼材の切断効果に影響を与えていることが判ったので、ここに報告する。

## 2. 鋼板の切断効果を把握するための実験

本実験の試験体は、中低層建物のH形鋼柱を想定し、広幅、中帽系の各H形鋼の内、使用実績の多いフランジ幅、板厚を考慮することにした。そのため、鋼板の試験体は、300×300 mmの正方形とし、板厚19mmのSS400鋼材および板厚38mmのSM490A鋼材の2種類を用意した。各鋼材の機械的性質をTable 1に、化学成分をTable 2に示す。

実験パラメータは、文献<sup>4)</sup>を参考に、①ライナー角 ( $\alpha=60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ の3種類: Fig. 1参照)、②成形爆薬の形状係数(爆薬高さ×爆薬幅の比) ( $\kappa=0.65\sim 0.95$ を設定: Fig. 1参照)、③ライナー材の材質(溶融亜鉛めっき鋼板、銅板の2種類)、④スタンドオフ(S=5mm, 10mmの2種類)の4種類を設定し、各パラメータを組合せて鋼板の破壊性状を観察した。(Table 3参照)

本実験で用いた成形爆薬は、Fig. 1に示すような爆薬ケース(硬質塩化ビニル板)にペントライトを溶融充

Table 2 Chemical composition of materials (Value of inspection certificate)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
	×100 (%)			×1000 (%)		×100 (%)		
SS400	16	18	63	25	2	—	—	—
SM490A	16	32	138	15	2	26	14	6

填したものを用意し、瞬発電気雷管により起爆した。なお、成形爆薬の設置方法は、鋼板上面に直置きとし、接着材等は用いなかった。

## 3. 鋼板の切断効果に関する実験結果および考察

本実験で用いた各成形爆薬の計測結果および起爆終了後の切欠き深さをTable 3に示す。ここで、鋼板の切欠き深さとは、鋼板の表面から鋼板内部に食い込んだライナーカッターの先端までの長さを表す。

同表中、\*印を付けた切欠き深さの値は、ライナーカッターが貫通していることから、鋼板の板厚を示している。ただし、切欠き深さの最大値を計測する際、ライナーカッターが電気雷管の起爆による衝撃効果で鋼板に深く食い込んだと見られる箇所は、計測対象から除外してある。

### 3.1 ライナー角の違いによる破壊性状

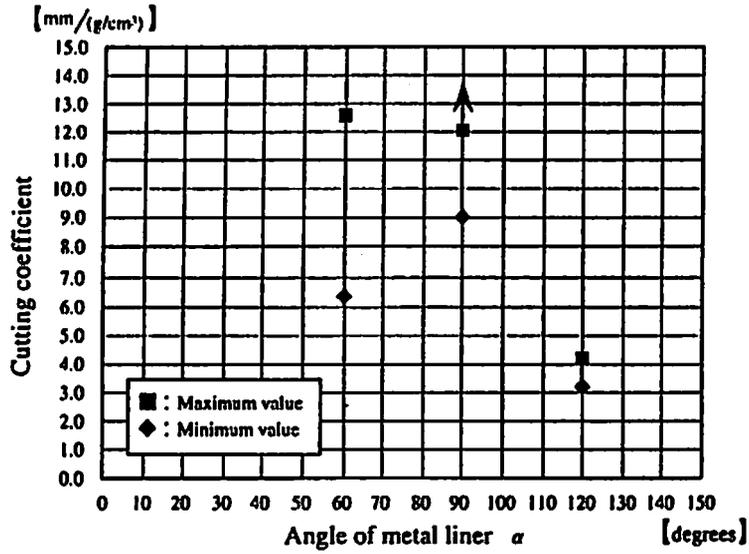
ライナー角の違いによる鋼板の切断効果の違いをFig. 2に示す。同図中、切断係数(Cutting coefficient)とは、鋼板の切欠き深さ(mm)を爆薬の充填密度( $g/cm^3$ )で除した値を示している。また、↑印は、ライナーカッターが鋼板を貫通したため、鋼板の板厚以上の値を把握することができなかったが、この値以上の切断効果を期待することができることを表している。

同図(a)に示すライナー材が溶融亜鉛めっき鋼板の場合、ライナー角 $90^\circ$ の試験体は、ライナーカッターが鋼板を貫通していることから、鋼板の板厚以上の切

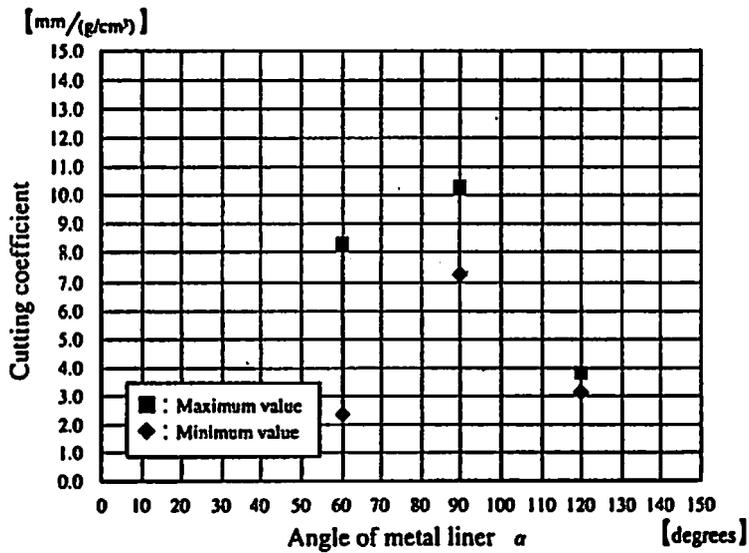
Table 3 Experimental parameters and measured dimensions of shaped charge and cutting effect

Name of specimen	Container of high explosive	Metal liner	Steel plate	$\alpha$	S (mm)	W (mm)	H (mm)	$\kappa$	L (mm)	G (g)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	D <sub>min</sub> (mm)	D <sub>max</sub> (mm)
SP19-Z08V30A3-K095-S05-D4	Hard vinyl chloride Thickness; 3.0mm	Galvanized steel sheet T = 0.8mm	SS400 t = 19.0mm	60°	5	20.20	19.20	0.95	330.0	103.0	1.478	9.30	18.55
SP19-Z08V30A2-K075-S05-D4				90°	5	20.00	15.00	0.75	330.0	103.0	1.561	14.00	18.70*
MP38-Z08V30A2-K071-S10-D2			10		21.02	14.74	0.70	370.0	108.6	1.472	14.55	16.95	
MP38-Z08V30A2-K075-S10-D2			10		20.20	15.45	0.76	369.9	124.0	1.596	15.00	19.55	
MP38-Z08V30A2-K084-S10-D2			10		19.50	16.16	0.83	369.9	115.1	1.414	13.45	19.70	
MP38-Z08V30A2-K089-S10-D2			10	18.19	16.28	0.89	370.0	107.9	1.366	17.15	19.70		
SP19-Z08V30A3/2-K065-S05-D4		Copper sheet T = 0.8mm	SS400 t = 19.0mm	120°	5	19.08	13.10	0.66	330.0	106.0	1.583	5.00	6.60
SP19-C08V30A3-K095-S05-D4				90°	5	20.79	19.08	0.92	330.0	112.0	1.620	3.75	13.45
SP19-C08V30A2-K075-S05-D4			5		20.38	15.08	0.74	330.0	105.0	1.564	11.30	16.00	
SP19-C08V30A2-K075-S10-D2			10		20.70	14.77	0.71	370.0	118.0	1.606	18.40*	18.50*	
MP38-C08V30A2-K071-S10-D2			10		21.04	15.04	0.71	370.0	118.7	1.559	10.90	20.30	
MP38-C08V30A2-K075-S10-D2			10		20.30	15.45	0.76	370.0	120.0	1.540	14.70	19.85	
MP38-C08V30A2-K084-S10-D2			10		19.09	16.17	0.85	370.0	121.9	1.514	17.40	19.35	
MP38-C08V30A2-K089-S10-D2			10		17.84	16.04	0.90	370.0	109.2	1.429	16.20	19.40	
SP19-C08V30A3/2-K065-S05-D4			SS400 t = 19.0mm		120°	5	20.18	13.07	0.65	330.0	108.0	1.597	4.90

$\alpha$ : Angle of metal liner, S: Stand - off, W: Width of high explosive, H: Height of high explosive,  $\kappa$ : Shape factor, L: Length of shaped charge, G: Weight of high explosive,  $\rho$ : Density of filled high explosive, D<sub>min</sub>: Minimum depth of cutting, D<sub>max</sub>: Maximum depth of cutting, \*: Minimum and maximum thicknesses of steel plates



(a) Case of galvanized steel sheet



(b) Case of copper sheet

Fig. 2 Cutting coefficient versus angle of metal liner



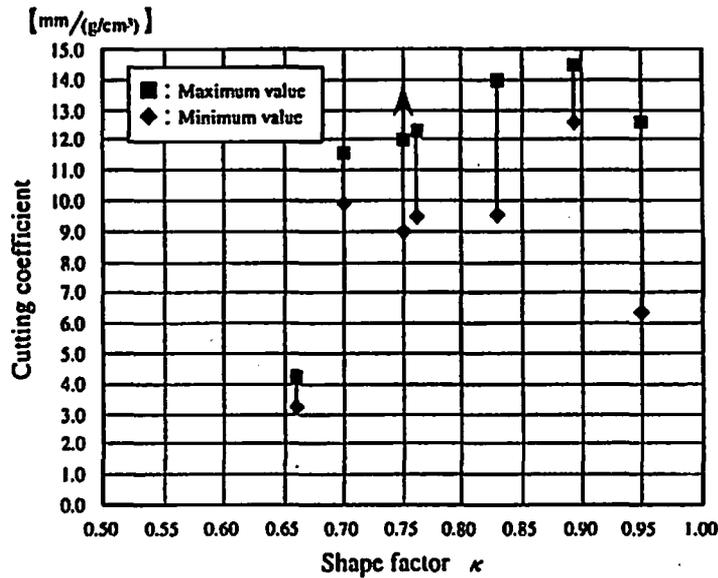
Photo. 1 Brittle failure of steel plates  
(Specimen: SP19-Z08V30A3/2-K065-S05-D4)

欠き深さを期待することができる。

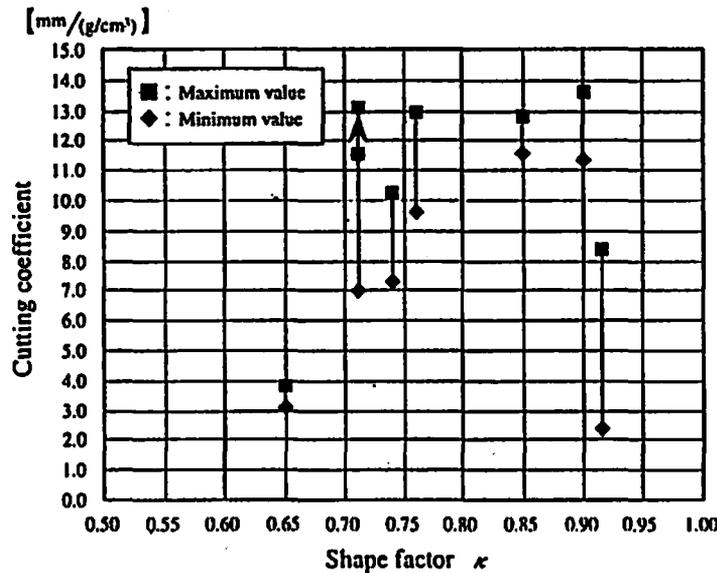
同図(b)に示すライナー材が銅板の場合、ライナー角90°の切断係数は、他のライナー角に比べて大き

く、鋼板の切断効果が十分に期待できるものと考えられる。

なお、ライナー材の材質の違いにも関わらず、ライ



(a) Case of galvanized steel sheet



(b) Case of copper sheet

Fig. 3 Cutting coefficient versus shape factor

ナー角60°の試験体は、切断係数の最大値と最小値の差が大きく、安定した切断効果を得ることができなかった。一方、ライナー角120°の試験体は、他の角度の試験体に比べて最大値が極端に低く、十分な切断効果を得ることができなかった。特にPhoto. 1に示す試験体は、ライナー材の角度が120°の鈍角で平板に近いことから、他の角度の試験体に比べて鋼板に衝突するライナーカッターの接触面が広く、ホプキンソン効果によく似た衝撃波の反射引張が広範囲に作用し、鋼板の脆性割れが発生したものと考えられる。

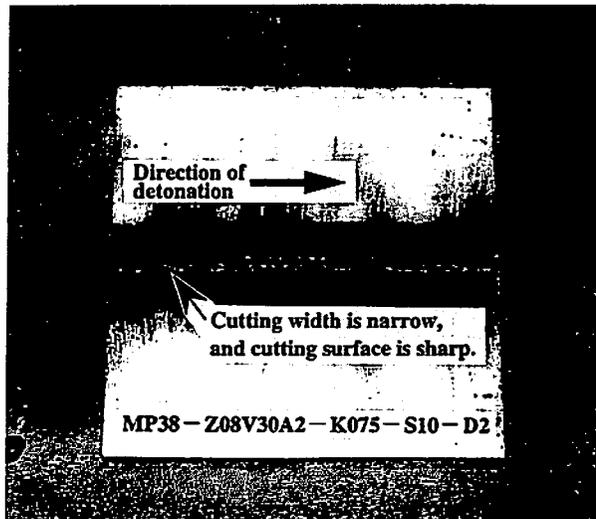
以上のことから、鋼板の切断効果は、ライナー角に大きく依存しているものと考えられ、ここで得られた

切断効果と成形爆薬の製造効率、および製造コストの低価格化を考慮すると、ライナー角を90°に設定するのが効果的である。

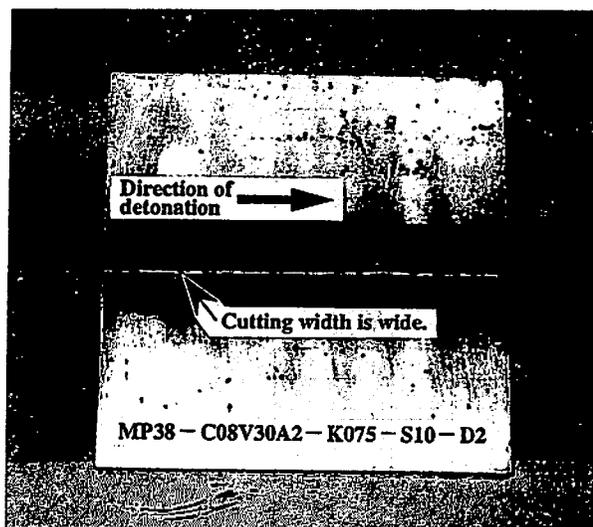
### 3.2 成形爆薬の形状係数の違いによる破壊性状

成形爆薬の形状係数( $\kappa$ )の違いによる鋼板の切断効果の違いをFig. 3に示す。

同図(a)に示すライナー材が溶融亜鉛めっき鋼板の場合、 $\kappa=0.66$ の試験体の切断係数は、その他の試験体と比べて極端に低く、十分な切断効果は期待できない。 $\kappa=0.95$ の試験体は、最大値と最小値に大きな差が見られ、安定した切断効果を得ることができなかった。 $\kappa=0.70\sim0.90$ の範囲内に設定した試験体では、



(a) Case of galvanized steel sheet



(b) Case of copper sheet

Photo. 2 Specimen after an experiment

形状係数が大きくなるにつれ、切断効果も若干大きくなる傾向を示した。

同図(b)に示すライナー材が銅板の場合、 $\kappa=0.65$ および $\kappa=0.92$ の試験体は、溶融亜鉛めっき鋼板と同様な傾向が見られ、十分な切断効果は期待できない。しかし、 $\kappa=0.70\sim 0.90$ の範囲内で設定した試験体では、形状係数の最大値はほぼ一定の値を示しており、この範囲で形状係数を設定するのが望ましい。

したがって、ライナー材の材質の違いに関わらず、成形爆薬の形状係数は、 $\kappa=0.70\sim 0.90$ の範囲内が適しているものと考えられる。

### 3.3 ライナー材の材質の違いによる破壊性状

ライナー材の材質の違いによる鋼板の破壊性状の違いをPhoto. 2に示す。

同写真(a)に示すライナー材が溶融亜鉛めっき鋼板



(a) Case of galvanized steel sheet



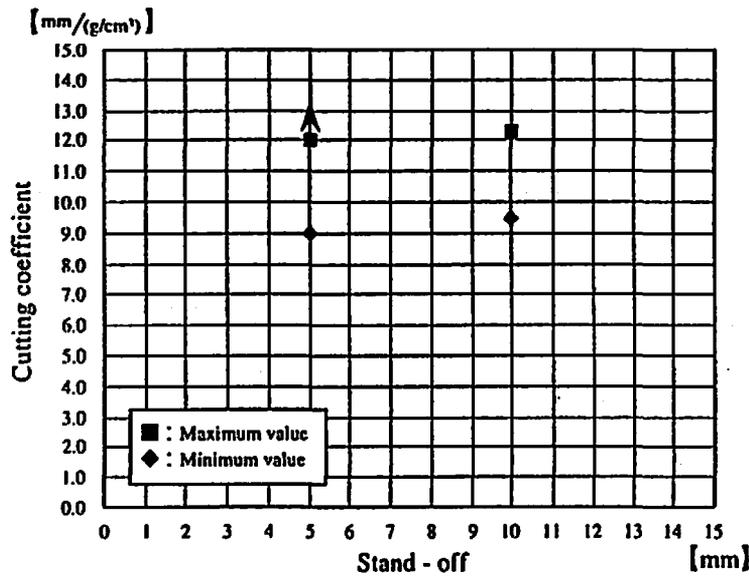
(b) Case of copper sheet

Photo. 3 Liner cutter after an experiment

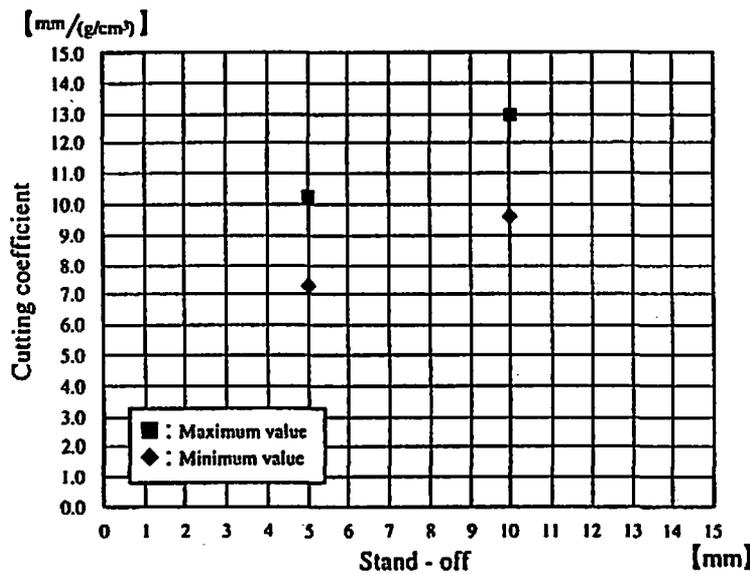
の場合、ライナー材は爆薬の爆発熱および爆轟圧の影響により、Center lineを中心に凸から凹にプレスされた形状(以後、刃物状と記す)に変形(Photo. 3-(a)参照)し、ライナーカッターを形成したものと考えられ、鋼板にくい込むような破壊性状を示していた。また、Fig. 3-(a), (b)を比較すると、同じ形状係数の銅板に比べ切断係数が大きくなる傾向が見られた。なお、実験終了後の鋼板の切断面は、溶融亜鉛めっき鋼板のライナーを用いた方がシャープであった。

一方、同写真(b)に示すライナー材が銅板の場合、爆薬の反応時の爆発熱および爆轟圧の影響により、ライナー材が溶融(Photo. 3-(b)参照)したものと考えられ、溶融したライナー材が鋼板を吹き飛ばすような破壊性状を示していた。また、実験終了後の鋼板の破断面は、溶融亜鉛めっき鋼板のライナー材を用いた場合の破断面に比べて凹凸の差が大きく、顕著な差が表われていた。

実際の鋼構造建物を発破解体する場合、H形鋼を構成している片側のフランジやウェブを部分切除して倒壊方向を制御する場合がある。この際、部分切除箇所に発生する大変形により、破断面の凹凸部から脆性亀裂が進展しないようにするためには、破断面の凹凸が少なく、シャープであることが必要となる。よって、鋼材の破断面の凹凸を少なくするためには、ライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用いる方が有効であると思われる。



(a) Case of galvanized steel sheet



(b) Case of copper sheet

Fig. 4 Cutting coefficient versus stand - off

### 3.4 スタンドオフの違いによる破壊性状

文献<sup>4)</sup>では、SPC(STEEL PLATE CUTTER)爆薬を用いたスタンドオフの違いによる鋼板の切断効果を実験的に検証し、有効なスタンドオフは爆薬幅の1/2であるとの結論を得ている。しかし、このSPC爆薬は製造中止となっており、これに変わる爆薬を用いたスタンドオフの違いによる鋼板の切断効果を把握する必要がある。

そこで本実験では、この文献<sup>4)</sup>の成果を基に、最も鋼板の切断効果が大きかったスタンドオフの5mmと10mmをパラメータとして設定した。このスタンドオフの違いによる鋼板の切断効果の違いをFig. 4に

示す。

同図(a)に示すライナー材が熔融亜鉛めっき鋼板の場合、スタンドオフの違いに関係無く、切断係数はほぼ一定になる傾向を示した。

一方、同図(b)に示すライナー材が銅板の場合、スタンドオフが5mmから10mmへと大きくなるにつれ、切断係数も大きくなる傾向を示している。

この結果から、爆薬にペントライトを用いた場合においても、爆薬幅の約1/2を想定した10mmの方が適しているものと考えられる。

### 4. 鋼材の衝撃破壊現象を把握するための実験

本実験では、2章と同様に300×300mmの正方形

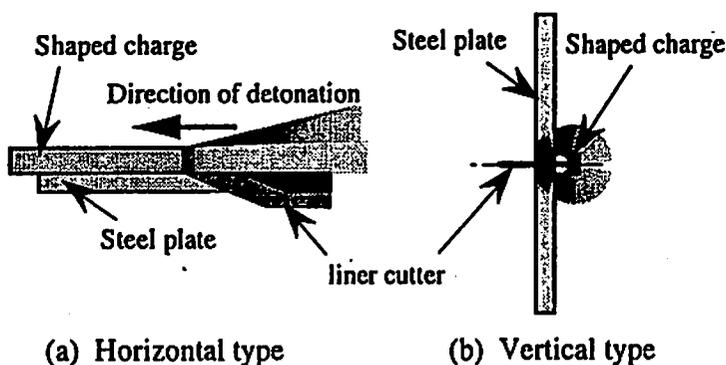
Table 4 Mechanical properties of materials

Material	$t$ (mm)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	YR (%)	EL (%)	HRB
SS400	19	262	429	61.0	33	94

$t$ : Thickness of steel plates,  $\sigma_y$ : Yield point,  $\sigma_u$ : Ultimate strength, YR: Yield ratio, EL: Elongation, HRB: Rockwell hardness (Scale B)

Table 5 Chemical composition of materials  
(Value of inspection certificate)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
	×100 (%)			×1000 (%)		×100 (%)		
SS400	15	19	68	10	3	—	—	—



(a) Horizontal type

(b) Vertical type

Fig. 5 Photograph direction and set-up of specimens

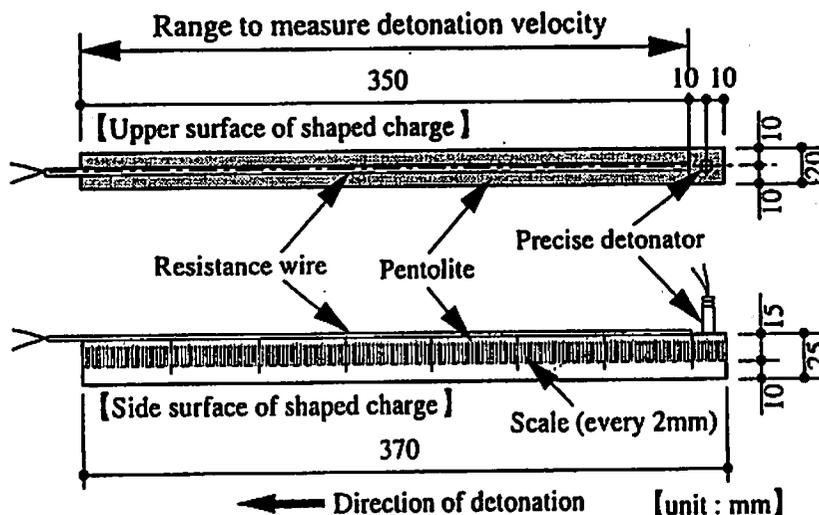


Fig. 6 Set-up of resistance wire to measure detonation velocity

鋼板で板厚19mmのSS400鋼材を用意した。この鋼材の機械的性質をTable 4に、化学成分をTable 5に示す。

実験パラメータは、ライナー材の材質の違い(溶融亜鉛めっき鋼板、銅板の2種類)による鋼板の破壊現象の把握のみとした。また、鋼板と成形爆薬の設置方向は、水平方向(梁部材を対象)と垂直方向(柱部材を対象)の2種類(Fig. 5参照)とし、成形爆薬の爆速とライナーカッターが鋼板に衝突する速度との関係およびライナーカッターが形成される過程を記録し、重力の影響による切断効果の違いも把握できるようにした。なお、高速度カメラによる撮影結果を良好に分析でき

るように、爆薬ケースは無色透明の亚克力樹脂板を用いた。これらの組合せをTable 6に示す。

本実験で用いた成形爆薬の形状は、前章で最も切断効果の大きかった形状係数( $\kappa=0.75$ )、ライナー角( $\alpha=90^\circ$ )を選定し、爆薬にはペントライトを、雷管には日本化薬(株)製の精密電気雷管を使用した。なお、成形爆薬の設置方法は、水平方向の場合は鋼板上面に直置きとし、鉛直方向の場合はテープで簡単に止める程度とした。

本実験では、爆速を計測する方法として、Fig. 6に示すような成形爆薬の上面に取り付けた抵抗線によって電圧の変化を計測する抵抗線法を採用した。なお、

Table 6 Experimental parameters and measured dimensions of shaped charge

Name of specimen	Container of high explosive	Metal liner	Steel plate	$\alpha$	S (mm)	W (mm)	H (mm)	$\kappa$	L (mm)	G (g)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	A way of photography
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.1	Acrylic resin colorless and transparency	Galvanized steel sheet T = 0.8mm	SS400 t = 19.0mm	90°	10	20.26	15.06	0.74	369.9	116.5	1.555	Horizontal
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.2						20.21	15.25	0.75	370.1	116.2	1.523	
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3						20.32	15.45	0.76	370.1	118.9	1.525	
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.4		Copper sheet T = 0.8mm				19.84	15.47	0.78	370.4	119.7	1.550	Vertical
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.5						20.07	15.41	0.77	370.2	114.5	1.483	
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.1	Thickness; 3.0mm	Copper sheet T = 0.8mm	SS400 t = 19.0mm	90°	10	20.26	15.24	0.75	370.0	116.3	1.525	Horizontal
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.2						20.35	15.44	0.76	370.1	116.4	1.493	
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3						20.17	15.49	0.77	370.1	122.6	1.572	
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.4						20.22	15.38	0.76	369.9	122.7	1.589	Vertical
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.5						20.08	15.40	0.77	370.2	120.6	1.563	

$\alpha$ : Angle of metal liner, S: Stand - off, W: Width of high explosive, H: Height of high explosive,  $\kappa$ : Shape factor, L: Length of shaped charge, G: Weight of high explosive,  $\rho$ : Density of filled high explosive

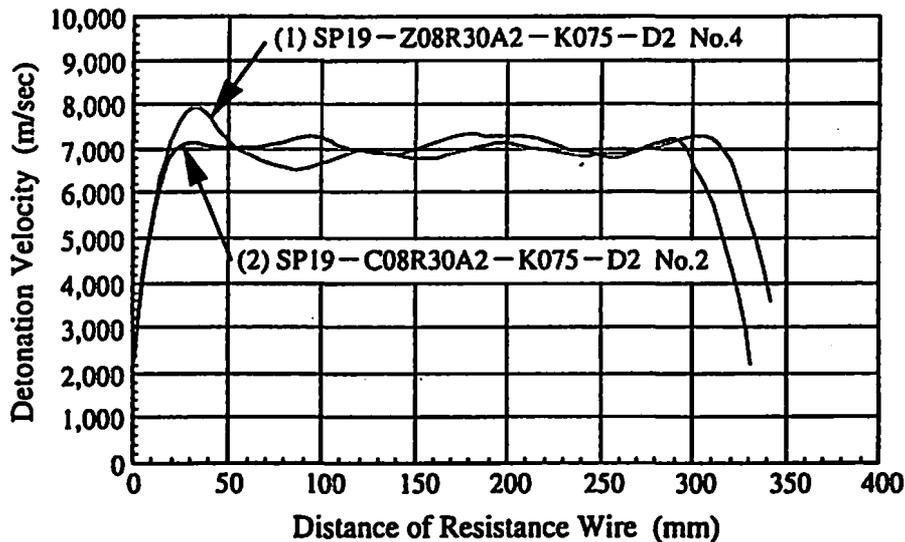


Fig. 7 Detonation velocity versus Distance of resistance wire

この抵抗線法により得られた爆速を確認する方法として、成形爆薬側面に2mm間隔の目盛を取り付けることにより、高速度カメラによる写真からも爆速が求められるようにした。

写真撮影で使用した高速度カメラは、Cordin社製フレミングカメラModel-124を使用した。なお、フレーム速度は500,000FPS(Frame Per Second)に、撮影コマ数は26コマ(2μsec/コマ)に設定し、鋼板の衝撃破壊現象を撮影することにした。

### 5. 鋼材の衝撃破壊現象に関する実験結果および考察

#### 5.1 爆速の計測結果

本実験で得られた爆速と抵抗線の距離との関係をFig. 7に示す。同図中、(1)はライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用いた場合の爆速を、(2)はライナー材に銅板を用いた場合の爆速を示している。なお、両試験体を含む全ての試験体は、ライナー材の材質、成形爆薬の設置方向に関係無く完全に切断されている。

同図から、ライナー材の材質の違いにも関わらず、爆速は7,000m/sec程度に達しており、定常爆轟状態になっていることが確認できた。また、試験体の設置方向に関係なく同程度の爆速が得られたことから、爆速は重力に関係なく一定である。また、切断効果は爆速に依存する傾向が見られることが、文献<sup>1)</sup>に記されている。

以上の結果から、本実験における爆速は重力に関係なく一定であり、そのため鋼板の切断効果も重力の影響を受けることなく成形爆薬の設置方向に対し十分な切断効果を有していると考えられる。

#### 5.2 高速度カメラによる写真撮影結果

高速度カメラによる写真撮影の結果をPhoto. 4 (Fig. 5-(a)の場合)、Photo. 5 (Fig. 5-(b)の場合)に

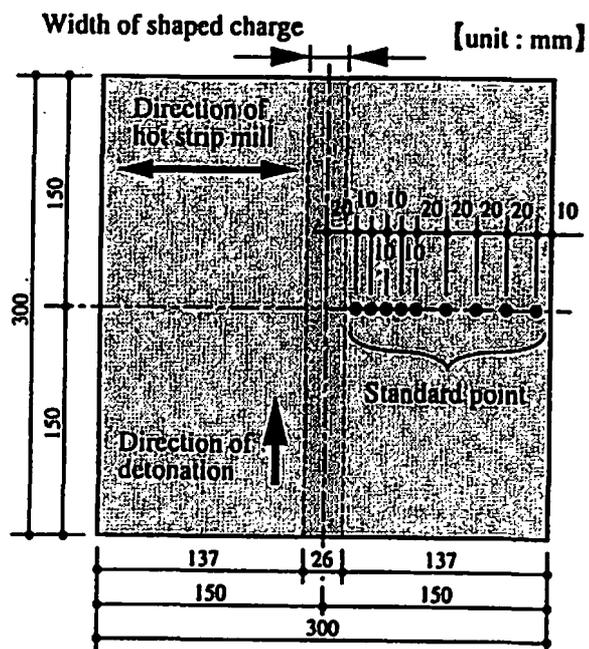
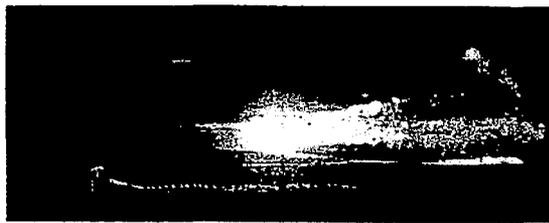


Fig. 8 Standard points of steel plates

示す。

Photo. 4から、爆薬の爆轟速度と、ライナーカッターが鋼材に衝突する速度は、どのコマを見てもほぼ同じであることが確認できる。また、Photo. 4, 5の2つの写真から、爆薬ケースと鋼板の設置位置はほとんど移動していないことが明らかとなった。

この爆薬ケースと鋼板の設置位置が移動しない現象として考えられることは、衝撃力にともなう鋼板の抵抗力が鋼板内部を伝播する前に鋼板の切断現象が完了しているものと思われる。なお、試験体の設置方向に関係なく同様な現象が見られ、十分な切断効果が得られた。



After 38  $\mu$ sec



40  $\mu$ sec



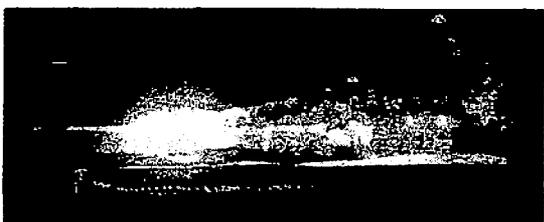
42  $\mu$ sec



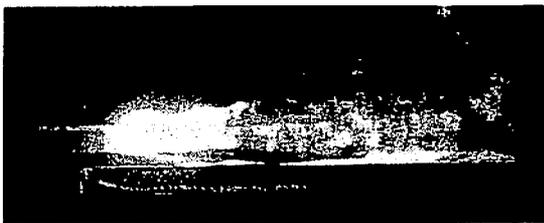
44  $\mu$ sec



46  $\mu$ sec



48  $\mu$ sec



50  $\mu$ sec

Photo. 4 Photographs of explosion phenomenon is taken from horizontal direction by high speed camera (Specimen: SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.2)



After 32  $\mu$ sec



44  $\mu$ sec



34  $\mu$ sec



46  $\mu$ sec



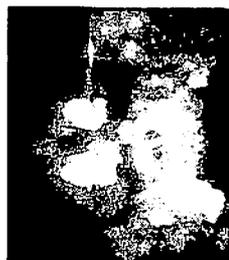
36  $\mu$ sec



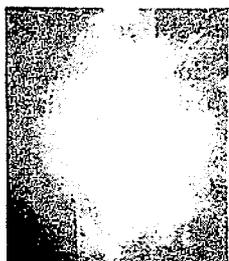
48  $\mu$ sec



38  $\mu$ sec



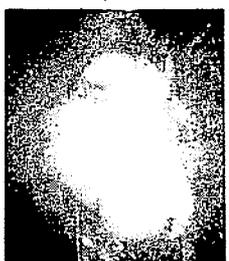
50  $\mu$ sec



40  $\mu$ sec



52  $\mu$ sec



42  $\mu$ sec



54  $\mu$ sec

Photo. 5 Photographs of explosion phenomenon is taken from vertical direction by high speed camera (Specimen: SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.4)

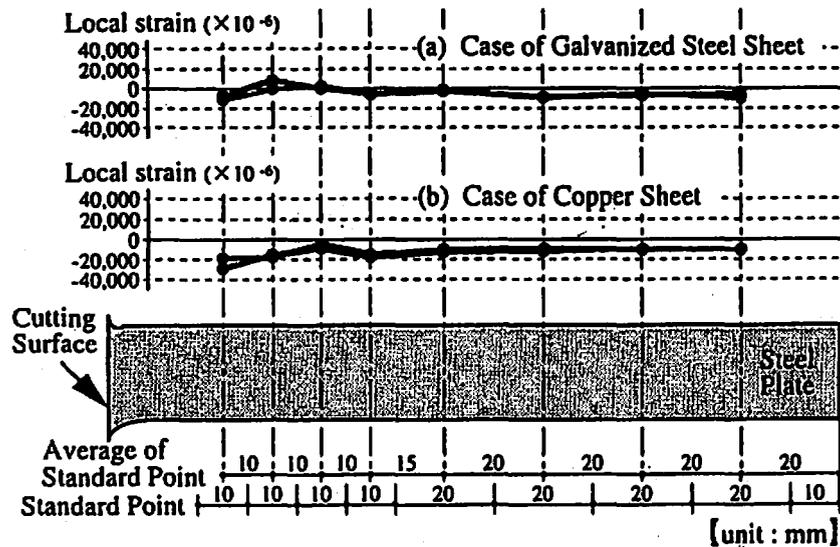
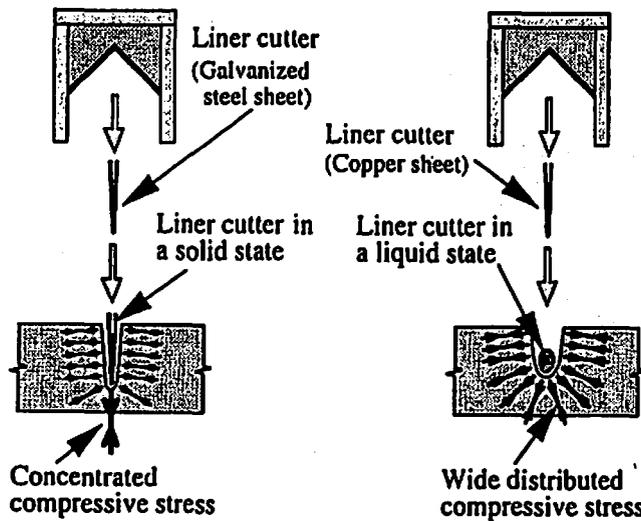


Fig. 9 Residual strain distribution of steel plates



(a) Galvanized steel sheet liners (b) Copper sheet liners

Fig. 10 Comparison of the cutting mechanisms of steel plates using galvanized steel and copper sheet liners

### 5.3 鋼板の残留歪分布と切断メカニズム

本研究では、ライナー材の材質の違いによる鋼板の衝撃破壊現象の違いおよび鋼板の切断メカニズムを解明する一手法として、予め鋼板の上面に標点(Fig. 8 参照)を設定し、実験前後の各標点間の計測結果から残留歪分布を求め分析することにした。このライナー材の材質の違いによる鋼板の残留歪分布を Fig. 9 に示す。

同図(a)に示すライナー材が溶融亜鉛めっき鋼板の場合、切断面近くに歪が集中する傾向にある。

一方、同図(b)に示すライナー材が銅板の場合、溶融亜鉛めっき鋼板に比べ切断面近くの歪の変化が大きく、広範囲で縮む傾向が認められた。

この現象の違いは、Fig.10に示すようにライナー材

が溶融亜鉛めっき鋼板の場合、ライナー材が鋼板に衝突する以前は溶融しておらず、刃物状に変形した形(Photo. 3-(a)参照)で鋼板に衝突した後も固体を維持しているものと考えられる。また、ライナーカッター先端の接触面が小さくなるほど、鋼板の周辺が受ける抵抗力は小さくなり、進行方向に作用する力が大きくなるものと考えられる。この結果、Fig. 9-(a)の残留歪分布のように、切断面近くに歪が集中するものと思われる。

一方、ライナー材が銅板の場合、ライナー材が鋼板に衝突する以前に溶融しているものと考えられ、Fig. 10-(b)に示すように、鋼板に衝突するライナーカッター先端の接触面が大きいほど、鋼板の周辺が受ける抵抗力も大きくなるものと考えられる。この結果、

Fig.9-(b)の残留歪分布のように、広範囲で縮む傾向が表われたものと思われる。

通常、成形爆薬による鋼板の切断は、爆薬を爆轟させることにより、ライナーの崩壊にともなって金属微粒子が放出して液化されたジェットを形成し、このジェットが鋼板に集中して切断されるというモンロー効果<sup>6)~8)</sup>が定説である。ただし、これらの文献では拘束効果の大きい爆薬ケースに円錐形状のライナーを用いた場合のメカニズムを説明しており、本実験で用いた成形爆薬とは大きく異なる。また、近年国内で実施された鋼構造建物の発破解体<sup>9)</sup>に用いられた成形爆薬は、閉鎖型の鋼製パイプをロール成形した爆薬ケースにRDX等の爆薬を充填した成形爆薬が用いられており、爆薬ケースの拘束効果が大きいことからジェットが形成されているものと思われる。ここでキーワードとなるのはジェットであるが、文献<sup>5)</sup>によると、ライナー材の変形速度(移動速度)が金属ライナー中の音速よりも若干速い程度まではジェットが発生するが、金属ライナー中の音速よりもある程度以上速い場合(超音速)、ジェットは発生しないことを説明している。

したがって、本研究のようにライナー材の変形速度が超音速状態ではジェットが発生せず、爆薬の反応にともなって爆薬ケースが気化するような成形爆薬では拘束効果も弱いことから、本実験で用いたような成形爆薬による鋼板の切断現象は、ジェットを伴わないライナー材の変形、移動、衝突(ライナーカッター)が鋼板の切断効果に大きく寄与しているものと考えられる。

## 6. まとめ

鋼構造建物の発破解体に関する基礎的研究の一要素として、成形爆薬を用いた鋼板の切断効果に関する実験と分析を行い、高速度カメラによる破壊現象の記録とこれら一連のメカニズムを考察した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 鋼材の切断効果を期待する場合、ライナー材が溶融亜鉛めっき鋼板および銅板に関わらず、ライナー角 $\alpha$ を $90^\circ$ 程度に設定するのが切断に対し効果的である。
- (2) 成形爆薬の形状係数は、ライナー材が溶融亜鉛めっき鋼板および銅板に関わらず、爆薬成形条件等により $\kappa=0.70\sim 0.90$ の範囲内で設定するのが望ましい。
- (3) 成形爆薬のスタンドオフは、ライナー材がライナーカッターに成長するために十分な距離を確保しなければならず、また、距離を取りすぎると切断効果が薄れることから、ライナー角 $\alpha$ が $90^\circ$ の場合、爆薬幅の $1/2$ 程度に設定するのが望ましい。

- (4) 成形爆薬に用いるライナー材の形状と爆薬ケースの拘束効果の違いにより鋼板の切断現象に違いが生じているものと考えられる。また、本研究で用いた成形爆薬のように爆薬ケースが気化することによる拘束効果の低下と、ライナー材の形状が単純な場合、鋼板の切断現象はジェットよりもライナーカッターによって切断されていると考えられ、これに伴い鋼材には若干の塑性変形が発生する。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、日本化薬(株)厚狭工場火薬研究所 委沢俊雄所長、広島大学工学部文部技官下川久義氏、(株)アールシーコア北河和美さん(当時広島大学工学部学生)には多大なる御協力を頂きました。また、広島大学工学部建設構造工学玉井宏章助手、工業技術院資源環境技術総合研究所和田有司主任研究官ならびに九州大学工学部資源工学科久保田士郎助手には多大なる御助言を頂きました。

ここに記して感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) 加藤政利, 中村雄治, 松尾彰, 橋爪清, 「成形爆薬による鋼材の衝撃破壊に関する実験的研究」, 構造工学論文集, Vol. 44B, pp. 541~548(1998)
- 2) 加藤政利, 中村雄治, 松尾彰, 近藤一夫, 玉井宏章, 橋爪清, 「爆薬を用いた鋼板の衝撃破壊に関する実験的研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)構造Ⅲ, pp. 527~528(1997)
- 3) 近藤一夫, 玉井宏章, 加藤政利, 「ハイブリッド型応力法による建物鉄骨架構の発破解体過程の数値シミュレーション」, 計算工学講演会論文集, Vol. 2, 第3号, pp. 959~962(1997)
- 4) 横川六雄, 三井志郎, 阿坂重文, 松原重一, 「SPC(STEEL PLATE CUTTER)による爆発進水について」, 工業火薬協会誌, Vol. 33, No. 6, pp. 360~364(1972)
- 5) 松原重一, 「爆薬による鋼材切断の研究」, 東京大学学位論文, pp. 8~19(1978)
- 6) 中原正二, 「火薬学概論」, 産業図書, pp. 132, pp. 265~269(1987)
- 7) 日本火薬工業会資料編集部, 「一般火薬学」, pp. 218, pp. 256(1991)
- 8) 久保田浪之介, 「火薬のはなし」; 日刊工業新聞社, pp. 80~83(1996)
- 9) 星野雅一, 長野正幸, 西田佑, 緒方雄二, 和田有司, 勝山邦久, 「鉄骨構造物の発破解体に関する研究(第2報 高炉筒発破解体工事)」, 火薬学会誌, Vol. 58, No. 3, pp. 123~130(1997)

**A study on the impact failure of steel plates and effective shape of shaped charges used for blasting demolition of steel multi-story buildings**

by Masatoshi KATO\*, Yuji NAKAMURA\*\*, Akira MATSUO\*\*  
Yuji OGATA\*\*\*, Kunihisa KATSUYAMA\*\*\*  
and Kiyoshi HASHIZUME\*\*\*\*

On the demolition works of steel multi-story buildings which reach their durable period, the blasting demolition method might be very effective. In order to control the demolition of steel buildings safely and surely, it is necessary that the minimum amount of high explosives shall be determined experimentally and the impact fracture mechanisms of steel plates with shaped charges shall be understood. Therefore, as the basic study which probes the impact fracture mechanisms of steel plates with shaped charges, we prepared the shaped charges, whose design parameters are materials of liners, shape factors, liner's angle and stand-off, and obtained the effective set-ups for cutting-off of steel plates with the minimum amount of explosives through many experiments. Although all impact fracture mechanism of steel plates with the shaped charge have been explained with Munroe effect so far, we present new interpretation on cutting-off of steel plates, which cannot be explained with Munroe effect. They are based upon the photograph with a high speed camera, measured detonation velocities and plastic deformations of steel plates.

(\*Engineering Research Division, Penta - Ocean Construction Co., Ltd.,  
2-2-8 Kouraku, Bunkyo, Tokyo 112-8576, Japan

\*\*Structural Engineering, Faculty of Engineering, Hiroshima University,  
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-hiroshima City, Hiroshima 739-8527,  
Japan

\*\*\*Safety Engineering Department, National Institute for Resources and  
Environment, AIST, MITI, 16-3 Onogawa, Tsukuba Science City,  
Ibaraki, 305-8569, Japan

\*\*\*\*Explosives and Catalysts Division, Nippon Kayaku Co., Ltd., Tokyo  
Fujimi Building, 1-11-2 Fujimi, Chiyodaku, Tokyo, 102-8172, Japan)