

# 鋼構造建物の発破解体時に発生する 鋼材の衝撃破壊に関する研究

課題番号 11650586

平成 11～12 年度科学研究費補助金  
(基盤研究(C)(2))研究成果報告書

平成 13 年 3 月

研究代表者 松 尾 彰  
(広島大学工学部教授)

## 研究組織

### 平成11年度

研究代表者：中村雄治（広島大学工学部教授）

研究分担者：松尾 彰（広島大学工学部助教授）

研究分担者：加藤政利（五洋建設(株)技術本部研究員）

### 平成12年度

研究代表者：松尾 彰（広島大学工学部教授）

研究分担者：加藤政利（五洋建設(株)建築本部建築設計部主任）

## 研究経費

平成11年度	2,000千円
平成12年度	900千円
計	2,900千円

## 研究発表

### (1) 論文発表

- ①加藤政利、中村雄治、松尾 彰、緒方雄二、勝山邦久、橋爪 清：鋼構造建物の発破解体時における鋼板の切断挙動に関する研究、鋼構造論文集、Vol.6、No.24、平成11年12月、pp.31～38
- ②加藤政利、中村雄治、松尾 彰、緒方雄二、勝山邦久、橋爪 清：成形爆薬による鋼構造建物の発破解体に関する研究（第1報 鋼板の材料強度の違いによる成形爆薬の切断能力）、火薬学会誌、Vol.61、No.6、平成12年12月、pp.281～295
- ③加藤政利、中村雄治、松尾 彰、緒方雄二、橋爪 清、近藤一夫：鋼構造建物の発破解体における柱部材の切断に関する研究（その1 成形爆薬によるH形鋼柱の切断，切除に関する制御）、日本建築学会構造系論文集、No.542、2001年4月に掲載決定

## (2) 学会誌等

- ①加藤政利、中村雄治、松尾 彰、緒方雄二、勝山邦久、橋爪 清、和田有司：成形爆薬を用いた構造用鋼材の切断に関する研究(I)、火薬学会秋季研究発表講演会要旨、平成11年10月、pp. 65 ~ 66
- ②加藤政利、中村雄治、松尾 彰、緒方雄二、勝山邦久、橋爪 清、近藤一夫：成形爆薬を用いた構造用鋼材の切断に関する研究(II)、火薬学会春季研究発表講演会要旨、平成12年5月、pp77 ~ 78
- ③加藤政利、中村雄治、松尾 彰、緒方雄二、橋爪 清、近藤一夫：爆薬を用いた鋼構造部材の衝撃破壊に関する実験的研究(その1:H形鋼柱の切断, 切除)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北大会)、構造Ⅲ、平成12年9月、pp. 1063 ~ 1064
- ④加藤政利、中村雄治、松尾 彰、緒方雄二、勝山邦久、橋爪 清：成形爆薬を用いた構造用鋼材の切断に関する研究(III)、火薬学会秋季研究発表講演会要旨、平成12年10月、pp. 19 ~ 20

## (3) 口頭発表

- ①加藤政利：成形爆薬を用いた構造用鋼材の切断に関する研究(I)、火薬学会秋季研究発表講演会、平成11年10月22日
- ②加藤政利：成形爆薬を用いた構造用鋼材の切断に関する研究(II)、火薬学会春季研究発表講演会、平成12年5月18日
- ③加藤政利：爆薬を用いた鋼構造部材の衝撃破壊に関する実験的研究(その1:H形鋼柱の切断, 切除)、日本建築学会東北大会、平成12年9月10日
- ④加藤政利：成形爆薬を用いた構造用鋼材の切断に関する研究(III)、火薬学会秋季研究発表講演会、平成12年10月19日

## 本論文で使用する主な記号

本論文内で使用する記号，略号はその都度説明するが，主な記号，略号は以下の通りである。

$a$	: TNT のモル数
$A_{str}$	: 鋼材およびコンクリートの発破式で用いる切断面積
$A(t)$	: 本研究の発破式で用いる板厚 (t) mm の鋼板の切断面積
$A_r$	: H 形鋼の実断面積
$A_{e1}$	: H 形鋼を斜め 45° に完全切断，部分切除する試験体の事前処理後の有効断面積
$A_{e2}$	: H 形鋼を水平に完全切断，部分切断する試験体の事前処理後の有効断面積
$b$	: PETN のモル数
$c$	: 二酸化炭素のモル数
$C_{hau}$	: ハウザーの発破式で用いる発破係数
$C_e$	: 本研究の発破式で用いる発破係数
$ave C_e$	: 本研究で得られた発破係数の平均値 [実測値]
$max C_e$	: 本研究で得られた発破係数の最大値 [実測値]
$min C_e$	: 本研究で得られた発破係数の最小値 [実測値]
$C_{str}$	: 鋼材およびコンクリート材料の発破式で用いる発破係数
$d$	: 水のモル数
$D'$	: 発破解体を実施する建物と周辺建物までの距離
$D_{hau}$	: ハウザーの発破式で用いる最小抵抗線
DS	: デシ秒の略
$e$	: 窒素のモル数
EL	: 伸び
$F$	: 火薬力
$f$	: 酸素のモル数
$\sigma_{fB}$	: 長期の許容曲げ応力
$\sigma_{fC}$	: 長期の許容圧縮応力
$F_s$	: 設計基準強度
$F_{sp}$	: 鋼材の引張強度 [公称値]
FPS	: フレーム速度 (Frame / sec)
H	: 成形爆薬の爆薬高さ
$H_1$	: 成形爆薬の爆薬高さ [実測値]
$H(t)$	: 鋼板板厚 (t) mm に対応する成形爆薬の爆薬高さ
HRB	: ロックウェル硬さ (B スケール)
cH	: 建物の軒高さ
cH'	: 柱のヒンジ間の距離
crH'	: ヒンジ間の部材の回転半径
KHT 式	: 木原，正田，田中の式
L	: 成形爆薬の爆薬長
$L_1$	: 成形爆薬の爆薬長 [実測値]
$LP_1$	: 起爆前の鋼板長さ [実測値]
$LP_2$	: 起爆後の鋼板長さ [実測値]
MS	: ミリ秒の略
$n$	: 反応生成物のモル数
$\sigma_{LN}$	: 設計用長期軸力



$L N_y$	: 降伏軸力
$P_0$	: 爆薬 1kg によって生成したガスの圧力
$Q$	: 爆発熱
$Q_0$	: 反応系の反応熱
$R_a$	: 分子気体定数
$St$	: 成形爆薬のスタンドオフ
$T$	: ライナーの厚さ
$t$	: 鋼材の板厚
$T_c$	: 絶対温度
$t_c$	: 摂氏温度
$T_e$	: 爆発温度
$V_0$	: 比容
$W$	: 成形爆薬の爆薬幅
$W_1$	: 成形爆薬の爆薬幅 [実測値]
$W(t)$	: 鋼板板厚 (t)mm に対応する成形爆薬の爆薬幅
$W_{han}$	: ハウザーの発破式で用いる装薬量
$W_{sc}$	: 本研究の発破式で用いる薬量
$W_{sc(t)}$	: 本研究の発破式で板厚 (t)mm に対する実際の薬量
$W_{sc(t)'}^*$	: 本研究の発破式で板厚 (t)mm かつ鋼板の有効長さに対応する有効薬量
$W_{str}$	: 鋼材およびコンクリート材料の発破式で用いる薬量
$X_i$	: 張間方向の i 通り
$Y_i$	: 桁行方向の i 通り
$YR$	: 降伏比
$\alpha$	: ライナー角 (頂角)
$\delta_P$	: 起爆後の鋼板中央のたわみ [実測値]
$\kappa$	: 成形爆薬の形状係数
$\kappa_1$	: 成形爆薬の形状係数 [実測値]
$\lambda$	: H 形鋼柱の細長比
$\rho_e$	: 爆薬の充填密度 [実験値]
$\sigma_u$	: 金属系材料の引張強度
$\sigma_y$	: 金属系材料の降伏応力
$L \sigma_B$	: 長期の曲げ応力
$L \sigma_{C1}$	: H 形鋼を斜め $45^\circ$ に完全切断, 部分切除する試験体の長期の圧縮応力
$L \sigma_{C2}$	: H 形鋼を水平に完全切断, 部分切断する試験体の長期の圧縮応力

目 次

第1章 序 論

1.1 本研究の背景	- 1 -
1.2 発破解体法の技術課題	- 3 -
1.2.1 現状の法的規則・学会指針	- 3 -
1.2.2 構造種別による発破解体の現状と展望	- 3 -
1.3 本研究の目的	- 4 -
【参考文献】	- 5 -

第2章 鋼構造建物の発破解体に用いる火薬類

2.1 まえがき	- 7 -
2.2 火薬類の定義	- 7 -
2.3 火薬類の分類	- 7 -
2.3.1 法規による分類	- 7 -
2.3.2 用途による分類	- 9 -
2.4 使用爆薬の選定	- 10 -
2.4.1 爆薬の選定条件	- 10 -
2.4.2 使用爆薬の決定根拠と特性	- 10 -
2.5 ペントライトの静的火薬力	- 11 -
2.6 爆薬による鋼材の切断	- 13 -
2.6.1 成形爆薬の概要	- 13 -
2.6.2 モンロー効果（ノイマン効果）	- 14 -
【参考文献】	- 14 -

第3章 材料強度の異なる鋼板に対する成形爆薬の  
切断能力と発破式

3.1 まえがき	- 15 -
3.2 既往の発破式	- 15 -
3.2.1 発破式の原点	- 15 -
3.2.2 鋼材およびコンクリート材料の発破式	- 15 -
3.3 実験計画	- 16 -
3.3.1 使用鋼板およびライナー材について	- 16 -
3.3.2 実験で用いる成形爆薬の形状と爆薬量の算出	- 17 -
3.3.3 実験パラメータ	- 18 -
3.3.4 実験方法	- 20 -
3.4 実験結果と考察	- 21 -
3.4.1 実験結果	- 21 -
3.4.2 鋼板の材料強度の違いによる切欠き深さ分布	- 23 -
3.4.3 鋼板の材料強度の違いによる切欠き深さの比較	- 26 -
3.4.4 鋼板の材料強度の違いによる切断係数の比較	- 28 -
3.4.5 ライナー材の材質，鋼板の材料強度および切欠き深さ の違いによる硬度分布の比較	- 29 -
3.4.6 鋼板の材料強度の違いによる変形量	- 36 -

3.5	鋼板の材料強度を考慮した発破式	39
3.5.1	発破係数の選定	39
3.5.2	ライナー材の材質の違いによる発破係数の比較	40
3.5.3	実験結果に基づく発破式	41
3.6	まとめ	44
	【参考文献】	44
<b>第4章</b>	<b>成形爆薬による鋼板の衝撃破壊メカニズム</b>	
4.1	まえがき	45
4.2	高速度カメラによる鋼板の破壊挙動の解明 に関する実験計画	45
4.2.1	使用鋼板およびライナー材について	45
4.2.2	実験パラメータおよび成形爆薬の形状と 試験体の設置方向	46
4.2.3	精密起爆器の概要	47
4.2.4	高速度カメラの概要	48
4.2.5	爆轟速度の計測方法	50
4.3	高速度カメラによる鋼板の破壊挙動の解明 に関する実験結果と考察	51
4.3.1	実験結果	51
4.3.2	爆轟速度の計測結果	51
4.3.3	高速度カメラによる写真撮影結果	55
4.3.4	鋼板の残留歪分布について	60
4.4	冶金的分析の方法	62
4.4.1	鋼板の化学成分の分析方法	62
4.4.2	顕微鏡による組織変化の撮影計画	63
4.5	冶金的分析の結果と考察	64
4.5.1	鋼板の化学成分の分析結果	64
4.5.2	顕微鏡による組織変化の撮影結果	65
4.6	衝撃破壊メカニズムの一考察	67
4.6.1	高速度カメラによる写真撮影結果に基づく 衝撃破壊メカニズム	67
4.6.2	鋼板の歪分布および硬度分布に基づく 衝撃破壊メカニズム	69
4.6.3	冶金的分析の結果および切欠き分布に基づく 衝撃破壊メカニズム	70
4.7	まとめ	74
	【参考文献】	74

<b>第 5 章 H 形鋼柱の切断・切除による建物倒壊</b>	
5.1 まえがき	- 75 -
5.2 鋼構造建物の発破解体パターン	- 75 -
5.2.1 敷地条件による倒壊方向の制御方法	- 75 -
5.2.2 ヒンジ機構の形成パターンおよび組合せ	- 76 -
5.3 成形爆薬による H 形鋼の切断・切除に関する実験計画	- 78 -
5.3.1 発破解体用建物の概要	- 78 -
5.3.2 H 形鋼の選定および実験パラメータ	- 79 -
5.3.3 H 形鋼の事前処理方法と切り取り寸法	- 80 -
5.3.4 実験で用いる成形爆薬の形状と爆薬量	- 82 -
5.3.5 実験方法	- 84 -
5.4 成形爆薬による H 形鋼の切断・切除に関する実験結果と考察	- 86 -
5.4.1 実験結果およびライナー材の材質の違いによる H 形鋼の切断状況	- 86 -
5.4.2 高速度カメラによる写真撮影結果	- 90 -
5.5 まとめ	- 94 -
【参考文献】	- 94 -
<b>第 6 章 総 括</b>	- 95 -

# 第1章 序 論

## 1.1 本研究の背景

諸外国(アメリカやヨーロッパ等)では老朽化した建物や現状の建築基準法に適合しない建物等を解体する一手法として、火薬類を用いた発破解体を頻繁に行っており、一部はマスコミ等でニュースとして取り上げられている。

この発破解体法は、爆薬量を変化させ、衝撃破壊力を制御することにより、大型重機の入り込めない狭い場所でも簡単に解体することが可能である。また、早期解体が実現でき、それに伴う全体工期の短縮およびコストの削減も可能になることが予想される。

諸外国においてこの発破解体法を頻繁に採用する理由として考えられることは、地震の少ない国の建物(図1-1-1参照)は日本の建物(図1-1-2参照)と異なり、耐震設計が殆ど為されておらず、主架構を除く部材は煉瓦、コンクリートブロック等を用いて構成されているため、解体し易いことが挙げられる。

一方国内では、建築基準法の一部改正による斜線制限の緩和ならびにバブル全盛期の建設ブームを受けて、中高層ビルの建設が進み、隣接する建物の間隔が狭くなる傾向にある。このような傾向と比例するかのように、現状の解体法では、狭い場所での無理な解体作業による隣接建物の被害や、人的災害が発生しているとの報告も一部の新聞等で報道されている。

このような状況の中で、太平洋戦争(1940~1945年)で空襲を受けた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耐用年数が近づいている今日において、これらの建物を同時期に解体しなければならない状態になることが大いに予想される。そこで、国内においても建物の発破解体法は有効であると考えられ、現時点で要素技術を確立しておく必要があると思われる。

しかし、現状における建物の発破解体法に関する問題は、

- ① 外国のある特定の建設業者のみが行っており、そのノウハウが公開されていない。
  - ② 日本ではこの分野に関する専門家<sup>21)~23)</sup>が極端に少なく、研究が進められていない。
- 等から、技術的な資料やデータがほとんど存在しない。

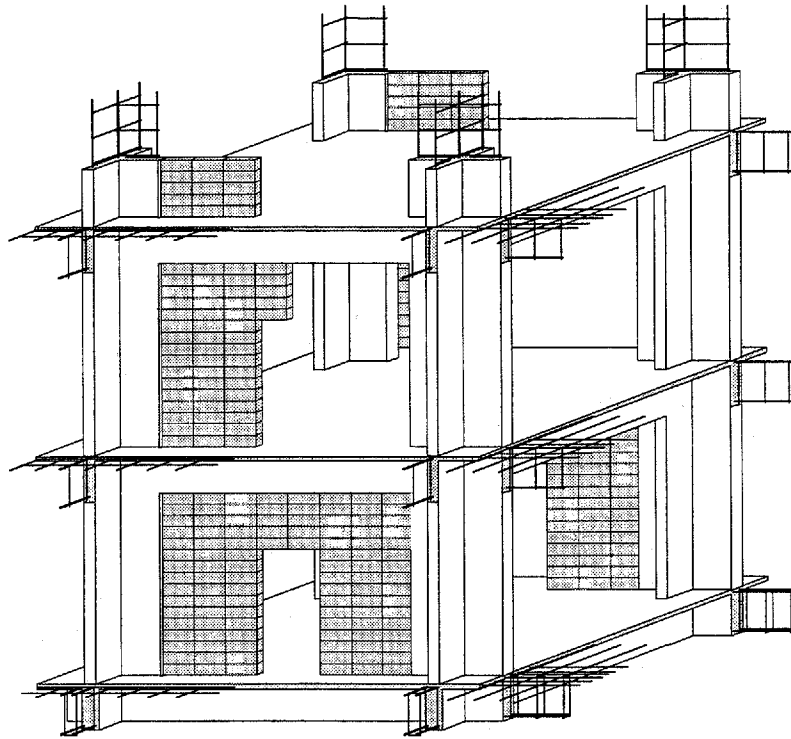


図1-1-1 地震の少ない国で多く見られる建物の概要

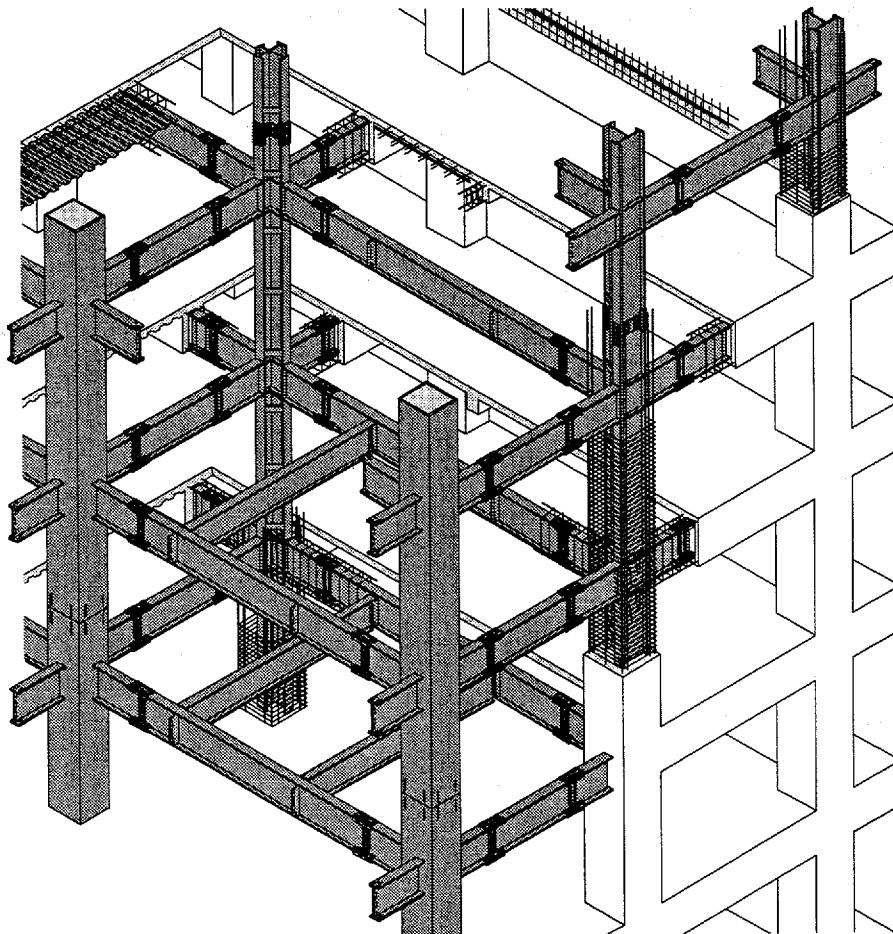


図1-1-2 日本国内で多く見られる建物の概要

## 1.2 発破解体法の技術課題

### 1.2.1 現状の法的規則・学会指針

国内における建物を対象とした発破解体法の研究起源は、1987年に通商産業省を主体とする都市構築物解体用発破対策委員会が全国火薬類保安協会内に設立されたことに始まる。ここでは、鉄筋コンクリート構造に関する研究が進められ、1990年にはその研究成果のまとめとして、保安技術指針「コンクリート構築物発破解体工事保安技術指針」等<sup>1), 2)</sup>が発刊された。また1992年10月15日には、通商産業省令第64号（火薬類取締法施行規則の一部を改正する省令）により、構築物解体用発破に関する項目が同施行規則の第54条の3に盛り込まれた。

しかし、この規定はコンクリート系の構築物を発破によって倒壊させ、解体する場合のもの<sup>4), 7)</sup>であり、都市構築物解体用発破対策委員会では鋼構築物に関する研究を行っていないため、鋼構築物に関する施行規則を規定することができなかった。

それから10年後、(社)日本建築学会材料施工委員会内の解体工事小委員会の活動により、「鉄筋コンクリート造建築物等の解体工事施工指針(案)・同解説」<sup>3)</sup>が1998年12月10日に出版され、同指針(案)(以後、建築学会指針(案)と記す。)内に火薬類による解体工法が盛り込まれた。しかし、建築学会指針(案)においても、火薬類取締法施行規則第54条の3(以後、火薬類取締法と記す。)と同様に、鉄筋コンクリート造の建物および工作物の解体工事に適用するものとし、鉄骨鉄筋コンクリート造の同様な解体工事に準用するとしている。

したがって、上述したように火薬類取締法および建築学会指針(案)では、鋼構造建物の発破解体に関して全く触れておらず、現在も鋼構造の建物および工作物の解体工事に適用する規則・指針は存在しないのが現状である。

### 1.2.2 構造種別による発破解体の現状

これまでに国内で報告されている建物の発破解体に関する研究は、鉄筋コンクリート造に関するもの<sup>4)~16)</sup>が大半であり、鋼構造に関する研究<sup>17)~22)</sup>は極端に少ない。なお、鉄骨鉄筋コンクリート造の歴史は、他の2構造に比べて比較的新しく、耐用年数を迎えるのは遙か先になることから、鉄骨鉄筋コンクリート造に関する発破解体の研究は行われていない。

現在、国内の鉄筋コンクリート造建物に対し発破解体した実例<sup>5), 6), 11)~15), 26)</sup>を分析すると、鉛直力を支持している柱に穿孔して爆薬(主に含水爆薬)を装填し、それを雷管によって起爆することによりコンクリートを砕くとともに重力を利用して地上に倒壊させる方法が採用されている。確かに破りコンクリートを砕き飛ばし、コアコンクリートを砕くことは出来るものの、新耐震設計法(1981年6月1日、建物の地震に対する安全性を見直すための新しい建築基準法施行令)以降、柱のフープ筋(帯筋)のピッチが100mm以下と密に配筋されていることから、含水爆薬ではフープ筋が切れず、フープ筋内のコアコンクリートが鉛直力を伝達し、倒壊しにくい現象が発生している。すなわち、鉄筋を切断することができないのが問題であると考えられる。

一方、国内の鋼構造建物に対し発破解体した実例<sup>17), 22)</sup>を分析すると、鉛直力を支持している柱または梁の一部を成形爆薬(爆薬にRDXやペントライトを使用)で完全切断するとともに重力を利用して地上に倒壊させる方法が採用されている。しかし、爆薬量を設定する根拠が乏しく、必要以上の爆薬量を使用するとともに、事前に柱部材の一部を切除する箇所が多さと切除面積が大きくなる傾向にある。これは安全かつ早期に解体できる発破解体のメリットを活かしきれていないと思われる。

そこで、これら各構造体に共通して言えることは、鉄・鋼系の材料に対し事前処理の手間を削減し、必要最小限の爆薬量で確実に切断するとともに倒壊方向が制御できることが重要な課題であると考えられる。したがって、国内の建物に発破解体法を採用するためには、鋼構造建物に対する発破解体の基礎研究を実施し、その技術を他の構造躯体に応用するのが有効であると考えられる。

### 1.3 本研究の目的

前節で述べたように、本論文では国内の鋼構造建物に対する発破解体法の要素技術に関して研究を行うものである。まず、発破解体法を鋼構造建物に適用する場合の長所を以下に示す。

#### 【発破解体法を鋼構造建物に適用する場合の長所】

- ①軸力を負担している柱を成形爆薬で切断、切除し、水平方向に大変形を生じさせることにより水平倒壊が容易となる。
- ②鋼構造は鉄筋コンクリート造よりも軽量構造体であり、地上に倒壊した際の地盤振動が小さい。
- ③解体時に発生する飛石等による二次的被害は、鉄筋コンクリート造の解体時と比較して鋼構造は遥かに少ない。
- ④鋼構造は単一部材から構成されており、鉄筋コンクリート造と比べて構造解析上の取扱いがやさしい。

これらの長所を活かし、安全かつ確実に鋼材を切断、切除し、設計通りの方向に倒壊させるための鋼構造建物の発破解体法を確立する必要がある。そのためには、成形爆薬による鋼材の衝撃破壊メカニズムを解明し、目的に応じた必要最小限の爆薬量を実験的に把握する必要がある。

しかし、現状の問題点として、

- ①SPC(Steel Plate Cutter)爆薬を用いた場合の鋼板の切断効果に関する詳細な研究報告<sup>20)</sup>が存在するものの、このSPC爆薬は製造中止となっており、これに代わる爆薬を用いた詳細な実験データの蓄積が必要である。
- ②鋼板の切断に用いる成形爆薬の爆薬量を求める際、通常用いられる発破式は鋼板の材料強度に関係なく切断する鋼板の断面積に比例し、鋼材の材料強度を無視しているが、高強度化されている現状を考慮すると、この発破式は成立しなくなることが予想される。
- ③成形爆薬による鋼板の衝撃破壊メカニズム<sup>27)~30)</sup>は、理論や仮説で説明されているものの実験的に実証されておらず、切断メカニズムに関する実験的な研究<sup>21)</sup>も少ないことから十分に解明されていない。

そこで本研究では、鋼構造建物の発破解体の実現に不可欠なこれらの要素技術に関するデータの蓄積と、衝撃破壊メカニズムに関する新たな知見について論じるとともに、倒壊方向の制御法について提案する。



## 【参考文献】

- 1) (社)全国火薬類保安協会：コンクリート構造物発破解体工事保安技術指針、平成3年4月
- 2) (財)日本産業技術振興協会：安全な発破解体技術の開発（官民連帯共同研究関連成果報告）、平成4年7月
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物等の解体工事施工指針(案)・同解説、平成10年12月
- 4) 日本コンクリート工学協会：特集\*コンクリート構造物の解体、コンクリート工学、Vol. 29, No.7、1991.7
- 5) NIKKEI ARCHITECTURE：発破解体(ケース2●木の岡レークサイドビル)、pp.114～117、1992.7
- 6) 建築技術：ダイナマイトによるビル解体ー大津・幽霊ビルで実施ー、建築技術8月号、pp.45～47、1992.8
- 7) 笠井芳夫：コンクリート技術の歴史 第4回 解体工法の変遷、コンクリート工学、Vol. 30, No.8、pp.87～91、1992.8
- 8) 解体工法研究会編：解体工法と積算(改訂3版)、(財)経済調査会、1995.10
- 9) 世一英俊, 坂田英一, 西村 毅, 三原陽治：構造物解体時のシミュレーション技術ーその現状と動向についてー、ハザマ技研年報、pp.317～324、1992
- 10) 柿崎正義, 小林正邦, 原田 実, 横田依早弥：制御爆破による大型コンクリート構造物解体の研究、鹿島技術研究所年報、第40号、pp.43～48、1992.10
- 11) 小林茂雄, 坂田英一, 池田義之, 中川浩二：鉄筋コンクリート構造物の発破解体について、土木学会第48回年次学術講演会、VI-PS7、pp.14～16、1993.9
- 12) 黒川孝一, 吉田忠雄, 斉藤照光, 山本雅昭, 中村重幸：旧高島炭鉱6階建て鉄筋コンクリート造集合住宅の発破解体(第1報)(建物の立地, 概要および要素技術実験)、工業火薬、Vol. 54, No. 6、pp. 255～264、1993.11
- 13) 笠井芳夫, 斉藤照光, 関 洋一, 石橋穰治, 富田幸助：旧高島炭鉱6階建て鉄筋コンクリート造集合住宅の発破解体(第2報)(倒壊計画, 前処理工事, 倒壊状況)、工業火薬、Vol. 54, No. 6、pp. 265～271、1993.11
- 14) 澤田一郎, 山口梅太郎, 小林直太, 中軸美智雄, 柴田秀昭, 新藤孝志：旧高島炭鉱6階建て鉄筋コンクリート造集合住宅の発破解体(第3報)(発破解体計画, 装薬設計, 振動, 騒音, 飛散物)、工業火薬、Vol. 54, No. 6、pp. 272～281、1993.11
- 15) 小林茂雄, 坂田英一, 橋爪 清, 中川浩二：鉄筋コンクリート構造物の発破解体設計と実施、土木学会論文集、No.498/VI-24、pp.67～76、1994.9
- 16) 坂田英一, 西村 毅, 小林茂雄, 中川浩二：不連続変形法(DDA)による鉄筋コンクリート構造物発破解体時における倒壊挙動のシミュレーション、土木学会論文集、No.522/VI-28、pp.77～86、1995.9
- 17) 小林茂雄, 木下雅敬, 中津賢一, 中川浩二：鉄骨構造物の発破解体工法における設計・施工、構造工学論文集、Vol.38A、pp.1213～1225、1992.3
- 18) 緒方雄二, 和田有司, 勝山邦久, 西田 佑, 星野雅一, 長野正幸：鉄骨構造物の爆破解体に関する研究(第1報 鉄柱部材の挙動について)、火薬学会誌、Vol. 58, No. 3、pp.116～122、1997
- 19) 星野雅一, 長野正幸, 西田 佑, 緒方雄二, 和田有司, 勝山邦久：鉄骨構造物の爆破解体に関する研究(第2報 高炉槽発破解体工事)、火薬学会誌、Vol. 58, No. 3、pp.123～130、1997
- 20) 横川六雄, 三井志郎, 阿坂重文, 松原重一：SPC爆薬(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
- 21) 松原重一：爆薬による鋼材切断の研究、東京大学学位論文、1978
- 22) 小林茂雄：構造物の発破解体に関する研究、山口大学学位論文、1994
- 23) 緒方雄二：発破孔内の爆薬の爆轟性と精密制御発破に関する研究、九州大学学位論文、1997

- 24) 加藤政利：成形爆薬を用いた鋼構造建物の発破解体に関する基礎的研究、広島大学学位論文、2000
- 25) 日本建築学会：ニューヨーク世界貿易センター爆破(1993年)被害と復旧、1995.8
- 26) (社)システム総合研究所：火薬類による都市構築物解体の最新技術シンポジウム、システム総合研究、1991.10
- 27) (社)火薬学会編：火薬ハンドブック、共立出版、1994.3
- 28) 佐藤忠五郎，福山郁生，若園吉一：爆破 [全訂2版]、鹿島出版会、昭和62年3月
- 29) 中原正二：火薬学概論、産業図書、昭和62年4月
- 30) 木村 真：火薬読本 -新しい火薬の知識と発破技術-、白亜書房、平成5年6月
- 31) 日本火薬工業会資料編集部：一般火薬学、平成3年4月
- 32) 久保田浪之介：火薬のはなし、日刊工業新聞社、1996

## 第2章 鋼構造建物の発破解体に用いる火薬類

### 2.1 まえがき

本章では、建築学の分野ではあまりなじみの少ない火薬類の定義と、その分類について説明するとともに、鋼構造建物の発破解体に使用する爆薬の選定条件、使用爆薬の決定根拠、爆薬の性能について検討する。また、成形爆薬の概要と鋼板の切断メカニズムで定説となっているモンロー効果（ノイマン効果ともいう）について説明する。

### 2.2 火薬類の定義

火薬類<sup>1)</sup>とは、爆発性物質の爆発または燃焼を利用して、破壊、推進、その他の目的に利用されるものをいう。その他の目的には、爆発の非破壊用途への応用として、爆発加工、爆発圧着、超高压利用の研究または無機化合物合成、火工品(2.3.1のC参照)の多目的利用等がある。なお、爆発性物質であっても、その目的が爆発燃焼性能を利用するものでないものは火薬類に含めない。

ここで、爆発<sup>2)</sup>とは、何らかの原因による圧力の急激な発生または圧力が解放される結果、激しく破裂したり、膨張したりする現象をいう。したがって、爆発には激しい音が伴う。この爆発には、物理的爆発と化学的爆発があるが、火薬類の爆発は化学変化を伴いつ燃焼の一形態としての爆発で、化学的爆発に該当する。また、爆発性物質<sup>2)</sup>とは、熱、光および音を伴う急激な分解を起こし、その生成物は高温、高压となって周辺に急激な膨張を生じさせるような物質をいう。

### 2.3 火薬類の分類

火薬類の分類<sup>2)</sup>には、①：法規(火薬類取締法)による分類(火薬、爆薬、火工品の3つ)、②：組成による分類(化合火薬類、混合火薬類の2つ)、③：用途による分類(発射・推進薬、爆破薬、炸薬、点火点爆薬類、伝爆薬、その他の6つ)の3種類がある。

ここでは、鋼構造建物の発破解体に必要と思われる①：法規による分類と③：用途による分類の一部について詳細に説明する。

#### 2.3.1 法規による分類

火薬類取締法では、火薬類を火薬、爆薬、火工品の3つに分類し、以下に示すように定義している。なお、同法による火薬類の分類の詳細を図2-3-1に、参考として火薬類の組成による分類の詳細を図2-3-2に示す。

##### a. 火薬 (Low Explosive, Powder)

火薬は推進的爆発の用途に使用されるものである。一般に爆発反応は、その反応伝播速度によって爆燃と爆轟に分けられる。爆燃とは、音速以下の速度で伝播する急速燃焼であり、ガスの膨張による推進力はあるが衝撃波を伴わない。一方、爆轟は、音速以上の速度を有する急速燃焼であり、音速を超えたと同時に衝撃波を伴う。

したがって、火薬の燃焼は爆燃であり、その燃焼速度(爆燃速度)は速くて数100m/sec程度である。なお、推進的爆発を起こす火薬は、ロケットを推進させる等の用途に使用される。

この火薬に属する代表的なものとして、花火、黒色火薬、無煙火薬等がある。

### b. 爆薬 (High Explosive)

爆薬は発破等の破壊的用途に使用するものである。しかし、最近では爆発力を制御して、成形、圧着、合成等にも利用されている。

爆薬の燃焼速度は、音速以上の速度(爆轟速度：2,000m/sec～9,000m/secにまで達する)で伝播し、爆轟状態になったと同時に衝撃波を伴い破壊力が増大する。爆薬は起爆の難易によって、一次爆薬(起爆薬)と二次爆薬に分かれる。一次爆薬は、少量のエネルギーで容易に点火され爆轟状態になる。二次爆薬は、雷管により起爆するなど、多量のエネルギーを集中的に与えないと爆轟しない。与えるエネルギーが少ない場合には、火が着かないか、着いてもよく燃える程度である。

一次爆薬には、DDNP(ジアゾジニトロフェノールの通称)、アジ化鉛等が含まれる。二次爆薬には、ニトログリセリン、TNT、RDX等が含まれる。なお、硝酸アンモニウム(硝安)や過塩素酸アンモニウムのように鈍感な爆薬は、雷管で起爆しても爆轟せず、二次爆薬により起爆するので、三次爆薬とも言われる。

### c. 火工品

火工品とは、火薬または爆薬を利用して、爆発反応の生起、伝達の他、個々の目的に適合するように加工したものである。

この火工品に属する代表的なものとして、工業雷管、電気雷管、空包、導火線、導爆線、コンクリート破砕器等がある。

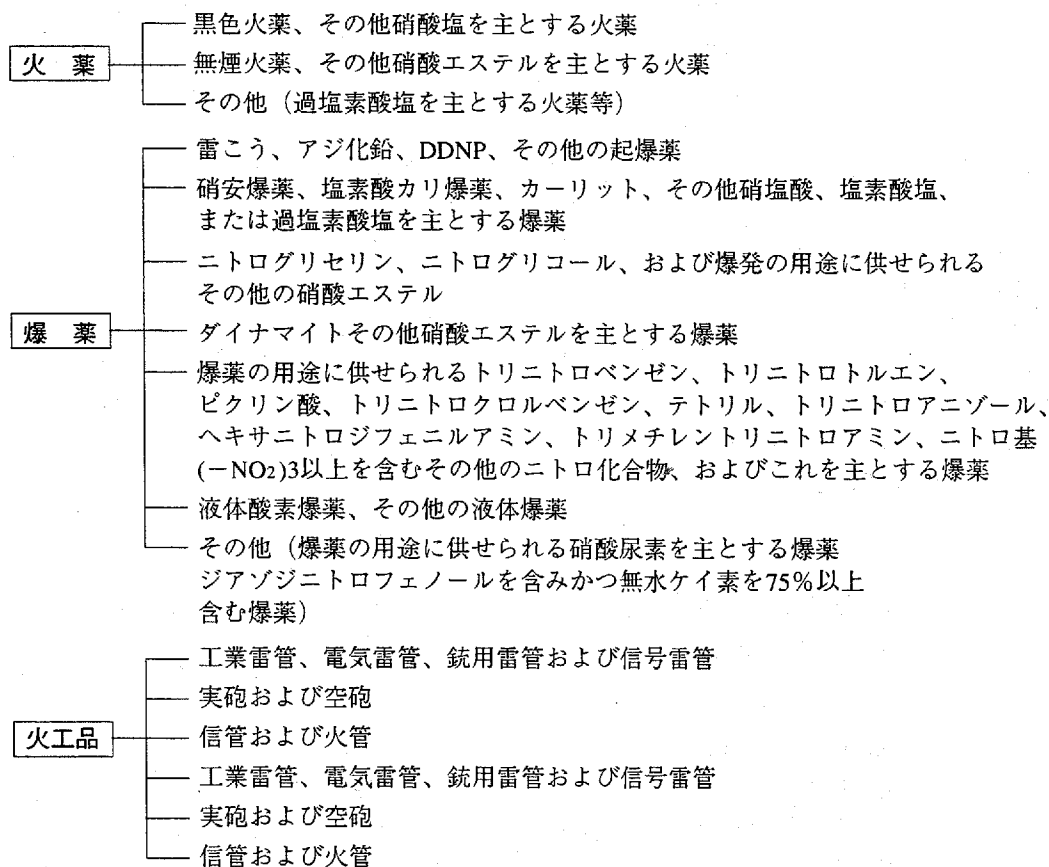


図 2-3-1 火薬類の法規による分類<sup>2)</sup>

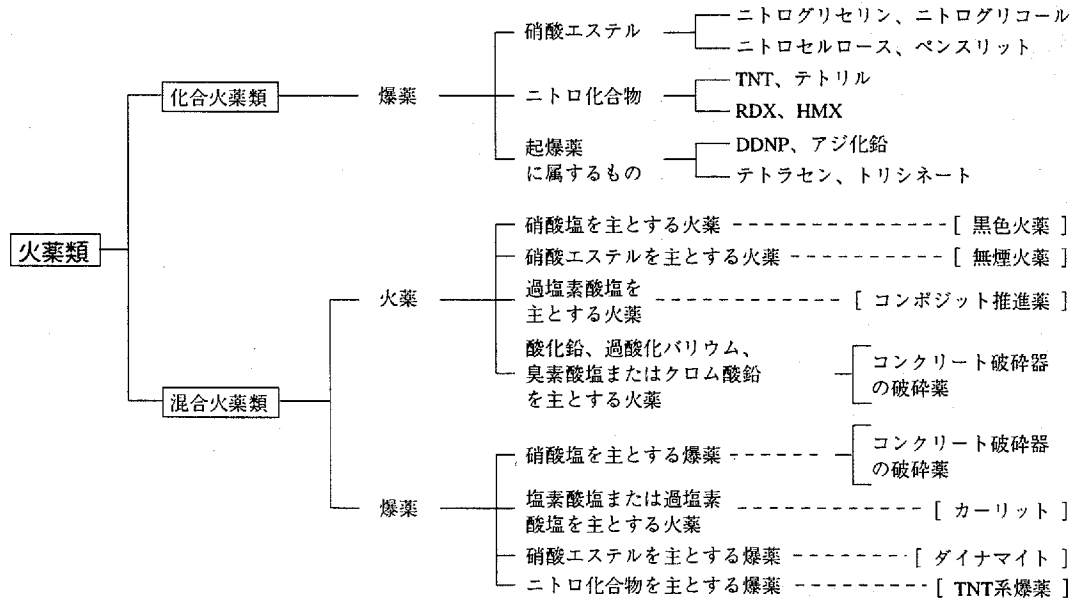


図 2-3-2 火薬類の組成による分類<sup>2)</sup>

### 2.3.2 用途による分類

火薬類は、各用途により分類し、以下に示すように定義している。

#### a. 発射薬・推進薬 (Gun Propellant, Rocket Propellant)

砲弾等を火砲から発射する火薬を発射薬といい、ロケットの場合は自らも燃焼しながら進んでいくので推進薬という。

この発射薬・推進薬に属する代表的なものとして、無煙火薬、黒色火薬、コンポジット推進薬等がある。

#### b. 爆破薬 (Blasting Explosive)

鉱山や土木工事等で岩石を爆破(発破という)に用いる爆薬である。

この爆破薬に属する代表的なものとして、含水爆薬、硝安油剤爆薬、ダイナマイト等がある。なお、諸外国で頻繁に行われている RC 造建物の発破解体には、含水爆薬、ダイナマイト等が使用されている。

#### c. 炸薬 (Bursting Explosive)

爆弾、砲弾、地雷等に装填し、炸裂させるための爆薬であり、異種の化合爆薬の混合物あるいは化合爆薬と非爆発性物質との混合物である。爆破薬と炸薬を総称して破壊薬(Disruptive Explosive)という。

この炸薬に属する代表的なものとして、TNT、コンポジション B 等がある。

#### d. 点火点爆薬類 (Priming Material)

火薬、爆薬を発火あるいは起爆させるための点火薬、起爆薬類ならびに雷管、導火線、導爆線等の火工品を含めて点火点爆薬類という。

#### e. 伝爆薬 (Booster)

炸薬を確実に爆轟させるために使用する爆薬である。炸薬は起爆薬で爆轟させようとしても、確実に爆轟するかどうか分からない。そこで、両者の中間に伝爆薬を介在させて爆轟の確実性を期待する。伝爆薬にはテトリル、PETN(ペンスリット)等が使われる。硝安油剤爆薬や一部の含水爆薬は雷管で起爆できないので、ダイナマイト等を使用して爆轟させる。この場合のダイナマイトも伝爆薬という。

## 2.4 使用爆薬の選定

### 2.4.1 爆薬の選定条件

本節では、鋼構造建物の発破解体に使用する爆薬を選定する。そのためには、爆薬の価格が安く、取扱いが比較的安全で、施工性の単純化による工期短縮が大いに期待できるものを選択する必要がある。

そこで、以下に挙げる各項目について考慮することにした。

- [1] 規格品で材料特性が安定しているもの。
- [2] 生産性が安定しているもの。
- [3] 混合爆薬の場合、混合物の品種が比較的少なく、爆発後の後ガスによる大気汚染の心配が少ないもの。
- [4] 自然環境下で化学的に安定しており、取扱いが安全であるもの。
- [5] 目的に応じて自由な形に成形できるもの。

### 2.4.2 使用爆薬の決定根拠と特性

現在、国内で生産されている多数の爆薬の内、前節の項目をほぼ満足し、雷管の添装薬としても使用されているペントライト(Pentolite)を使用爆薬として選定した。このペントライトは、混合爆薬内の混合炸薬に属し、トリニトロトルエン(Trinitrotoluene : TNT)とペンスリット(Penthrite : PETN)の混合物で、可塑性爆薬と称されている。ここで、混合炸薬は高猛度\*1・高爆力でしかも圧填\*2しやすく、応用範囲を広くするために開発された爆薬である。

ペントライトは、以下に示す特徴を持つことが必要とされている。

- [1] 爆速(爆轟速度の略称)と破壊力が大きい。
- [2] 感度が鈍感かつ製造取扱いが安全である。また、雷管によって完全に爆轟する。
- [3] 安全度が良好で、長期に保存しても変質や性能劣化がなく、吸湿性が少ない。
- [4] 多少の水分があっても、また加温されても金属材料と反応しない。
- [5] 熔融することにより、自由な形に成形できる。すなわち、可塑性である。
- [6] 多量生産が可能で、価格が安い。

このように、ペントライトの特性は前節(2.4.1)に示した要求項目をほぼ満足しており、鋼構造建物の発破解体に用いる爆薬として適しているものと判断した。なお、本研究で用いたペントライトの組成分析結果を表2-4-1に、ギャラリー法による後ガス分析結果を表2-4-2に示す。

表2-4-1 ペントライトの組成分析結果

	標準組成 (重量比)	組成分析値 (重量比)
TNT	50 (%)	50.5 (%)
PETN	50 (%)	49.5 (%)

表2-4-2 ペントライトの後ガス分析結果

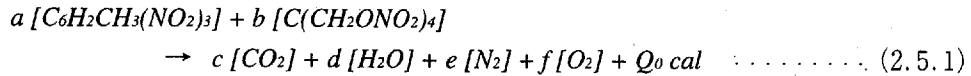
薬量		ペントライト 200g (紙筒 30φ×100, 2本)	
使用雷管		6号瞬発雷管	
結 果	NO <sub>x</sub>	2.3 (l/kg)	20 (ppm)
	CO	1.2 (l/kg)	10 (ppm)
	CO <sub>2</sub>	350.0 (l/kg)	3,000 (ppm)
	NH <sub>3</sub>	—	—

\*1 猛度：爆轟の激しさ、爆轟波面圧力で代表される。

\*2 圧填：圧力をかけて装填する。

### 2.5 ペントライトの静的火薬力

本節では、実験で使用するペントライトの静的火薬力を把握するため、文献3)を参考に理論的に求める。しかし、通常の化学反応に関する理論解析を行う場合、必ずしも仮定通りの爆発反応を起こすとは限らないが、代表的な爆発反応生成物(以後、反応生成物と記す)を、 $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  の4種類が発生するものと仮定し、ペントライトの爆発反応を式(2.5.1)のように仮定した。



ここで、 $a, b$  はペントライト1kg中に含まれている各成分のモル数を、 $c, d, e, f$  は各反応生成物質のモル数を、 $Q_0$  は反応系の反応熱を示している。

#### a. 爆発熱( $Q$ )について

爆発熱とは、爆薬1kgが爆発反応を起こした際に発生する熱量であり、ここではペントライトの熱量を求める。

まず、式(2.5.1)から各モル数を求めると、以下の値となる。

$$\begin{aligned} a &= 2.201 \text{ mol} & b &= 1.582 \text{ mol} & c &= 23.317 \text{ mol} \\ d &= 11.831 \text{ mol} & e &= 6.466 \text{ mol} & f &= -13.138 \text{ mol} \end{aligned}$$

ここで、反応物質および反応生成物の生成熱は25℃, 1atm(標準反応熱で定義される標準状態)のとき、以下のように与えられる。

TNT	: 13,500 cal/mol
PETN	: 122,410 cal/mol
二酸化炭素	: 94,052 cal/mol
水	: 57,798 cal/mol

ただし、窒素、酸素は0 cal/molである。

したがって、

$$Q_0 = \Sigma(\text{反応生成物の生成熱}) - \Sigma(\text{反応物質の生成熱}) = 2,653.45 \text{ kcal} \dots\dots\dots (2.5.2)$$

しかし、真の爆発熱( $Q$ )は、 $Q_0$ よりも爆発生成物が常温( $T_c$ )で大気圧まで膨張する熱量だけ余分に必要である。よって、式(2.5.2)の値を用いて理想気体の法則を適用すると、式(2.5.3)となる。

$$\begin{aligned} Q &= Q_0 + n \cdot R_a \cdot T_c \\ n &: \text{反応生成物のモル数}, R_a : \text{分子気体定数}, T_c : \text{絶対温度} \\ \therefore Q &= 2,653.45 + 28.476 \times 0.001986 \times (273.16 + t_c) \\ &= 2,668.91 + 0.0566 \cdot t_c \text{ [kcal]} \dots\dots\dots (2.5.3) \end{aligned}$$

ただし、 $t_c$  は摂氏温度(℃)である。

#### b. 比容( $V_0$ )について

比容とは、爆薬1kgから爆発生成するガスの体積を標準状態に換算した値である。この体積は気体状態方程式を用いて容易に求めることができる。

したがって、爆発反応により生成する反応生成ガスの体積は、式(2.5.4)で与えられる。

$$V_0 = 22.41 \times (c+d+e+f) = 638.15 \quad [l] \dots\dots\dots (2.5.4)$$

c. 爆発温度( $T_e$ )について

爆発温度とは、爆薬 1kg が爆発反応を起こしたときに得られる最高温度であり、文献3)を参考に、各反応生成物の平均分子熱を用いた爆発熱( $Q$ )は式(2.5.5)で与えられる。

$$Q = 0.401 \times (T_e - T_c) - 157.412 \quad [\text{kcal}] \quad \dots \dots \dots (2.5.5)$$

ここで、式(2.5.3)と式(2.5.5)は等しいことから、 $T_e$ について整理すると式(2.5.6)が得られる。

$$T_e = 7,321.35 + 1.141 \times t_c \quad [\text{K}] \quad \dots \dots \dots (2.5.6)$$

d. 火薬力( $F$ )について

火薬力は、爆薬 1kg を爆発させたときに生成するガスを、1l の容器に収納した場合に示す圧力値である。

したがって、爆薬 1kg によって生成したガスが爆発温度( $T_e$ )、比容( $V_0$ )の条件下における圧力を  $P_0$  とすると、火薬力( $F$ )は

$$F = P_0 \cdot V_0 \cdot T_e / 273.16$$

で表すことができ、前節までに求めた各値を代入すると、火薬力( $F$ )は次のように求められる。

$$P_0 = 1.0332 \quad [\text{kg/cm}^2]$$

$$F = P_0 \cdot V_0 \cdot T_e / 273.16 = 17.671 + 0.0028 \times t_c \quad [l \cdot \text{ton/cm}^2] \quad \dots \dots \dots (2.5.7)$$

実際に爆薬を爆発させると爆轟し、破壊力も増大する。この爆轟現象を考慮した動的な特性<sup>4)</sup>は実験的および理論的(KHT式：木原，疋田，田中の式)に求められている。そこで、ペントライトを含む代表的な爆薬の爆轟特性を表2-5-1に示し、同表中の爆轟圧力(爆圧)と爆轟速度(爆速)との関係を図2-5-1に示す。

図2-5-1から、爆圧と爆速との間には2次曲線的な関係にあることが判断できる。この現象は、文献1)の爆轟理論に示されているように、爆轟圧力は爆轟速度の2乗に比例することを裏付けている。

表2-5-1 代表的な爆薬の爆轟特性 [文献4)より]

爆 薬	化 学 式	初期密度 (g/cm <sup>3</sup> )	爆 速 (m/s)	爆 圧			温 度* (K)	爆轟エネルギー* (MJ/kg)
				(GPa)	(t/cm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )		
TNT	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>6</sub>	1.63	6,930	21.0	214.1	20,982	3,420	5.330
ニトロメタン	CH <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>	1.128	6,290	12.7	129.5	12,691	3,300	5.411
ニトログリセリン	C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>9</sub>	1.59	7,580	23.5*	239.6*	23,481*	3,871	6.089
HMX	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>8</sub> O <sub>8</sub>	1.90	9,100	39.3	400.7	39,269	3,361	6.152
RDX	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	1.80	8,754	34.7	353.8	34,672	3,488	6.202
PETN	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> N <sub>4</sub> O <sub>12</sub>	1.77	8,300	31.7	323.3	31,683	3,668	6.278
テトリル	C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1.70	7,560	24.2	246.8	24,186	3,791	5.867
アジ化銀	AgN <sub>3</sub>	2.00	3,500	3.7*	37.7*	3,695*	3,912	1.916
Composition B	RDX64 / TNT36	1.713	8,030	29.4	299.8	29,380	3,658	5.888
ペントライト	PETN50 / TNT50	1.65	7,465	23.5*	239.6*	23,481*	3,607	5.779
チタマイト**	エマルション爆薬	~1.1	5,500	8.3*	84.6*	8,291*	1,830	2.745

\* : KHTによる計算値, \*\* : 製品名を示す



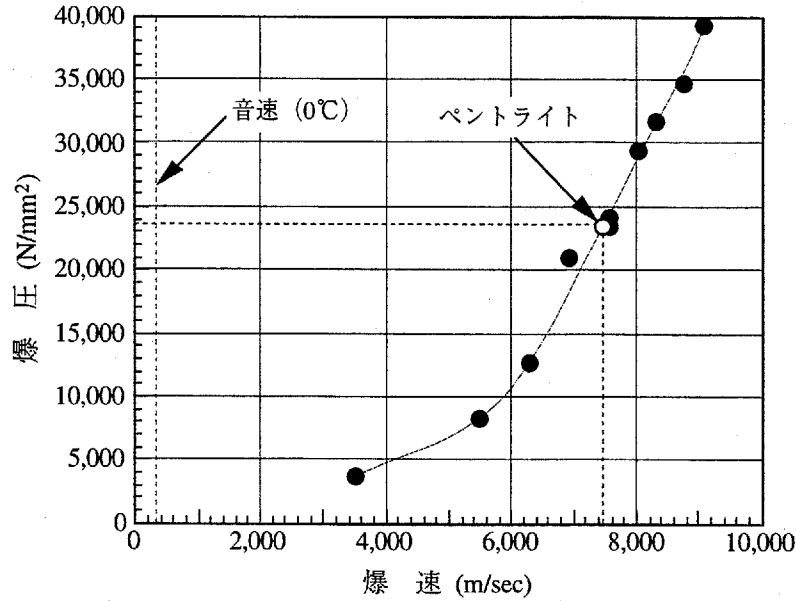


図2-5-1 爆轟圧力(爆圧)と爆轟速度(爆速)との関係

## 2.6 爆薬による鋼材の切断

### 2.6.1 成形爆薬の概要

成形爆薬(Shaped Charge)は、爆薬を覆う爆薬ケースとライナー材(銅、鉄、鉛、アルミニウム等)から成り、爆薬ケースとライナー材との間に爆薬を溶融充填または圧入充填したものである。

この成形爆薬は、円柱形の爆薬ケースに円錐形のライナー材を組合せたものが一般的であり、主に金属板等に丸く穿孔する際に用いられている。一方、鋼板等の線状切断には、図2-6-1に示すように、四角柱形の爆薬ケースに逆V字型のライナー材を組合せたもの、または写真2-6-1に示すように、爆薬ケースとライナー材が一体化した逆ハート型のものの2種類がある。

この線状切断に用いる成形爆薬は、前者を成形爆破線と称し、後者をV型成形爆破線(共にLiner Shaped Charge)と称されているが、一部火薬メーカーの商品名と類似しているため、公平性を考慮した上で、本論文では単に成形爆薬と称することにする。

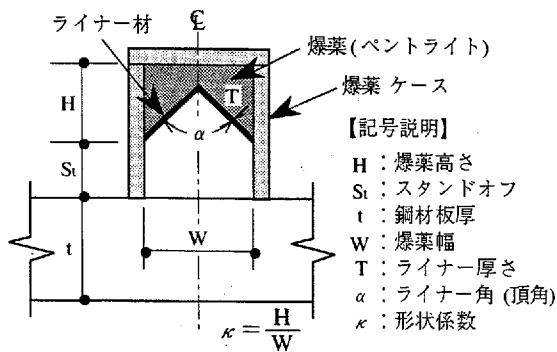


図2-6-1 本研究で用いた成形爆薬の概要



写真2-6-1 一般的なV型成形爆破線の模型

## 2.6.2 モンロー効果（ノイマン効果）

成形爆薬を用いて鋼構造躯体を切断分離する場合、この際の破壊メカニズムとして定説<sup>1), 5), 6)</sup>となっているのがモンロー効果(Munroe Effect)またはノイマン効果(Neuman Effect)と呼ばれるものである。

このモンロー効果(ノイマン効果)は、約100年前から理論的に説明されてきたものの、爆発現象が音速を遥かに超えるため実験的に実証されているものではない。したがって本節では、このモンロー効果(ノイマン効果)における鋼板の切断メカニズムを以下に説明し、実験的に検証した考察については、後の第4章で述べる。

モンロー効果(ノイマン効果)とは、

- ①逆V字型のライナー材(金属)を有する成形爆薬を準備し、鋼板を切断したい箇所にセットする。
- ②電気雷管等により起爆し、爆轟させる。ここで爆轟とは、音速以上の速度を有する急速燃焼であり、衝撃波を伴うと共に破壊力も増大する。
- ③爆轟によるライナー材の崩壊に伴って金属微粒子が放出される。
- ④金属微粒子が棒状の集団となって下方に進行し、メタルジェット(ノイマンジェット)を形成する。
- ⑤爆薬の威力は、メタルジェットにより下方の鋼板に集中され、鋼板を完全に切断する。

以上、①～⑤までの過程を図示したものが図2-6-2である。

メタルジェットを有効に利用するためには、そのメタルジェットの長さを十分に発達させなければならぬが、そのためには成形爆薬を目標物(鋼板)からある程度離さなければならない。これをスタンドオフ(Stand-off)という。

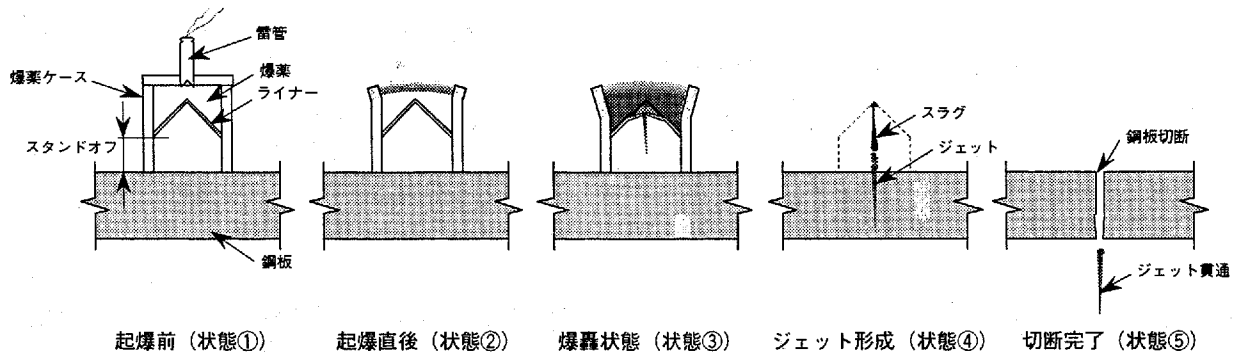


図2-6-2 モンロー効果（ノイマン効果）の概要

### 【参考文献】

- 1) 中原正二：火薬学概論、産業図書、1987
- 2) 火薬学会編：火薬ハンドブック、共立出版、1994
- 3) 佐藤忠五郎、福山郁生、若園吉一：爆破 [全訂2版]、鹿島出版会、昭和62年3月
- 4) 高山和喜 編：衝撃波ハンドブック、Springer (シュプリンガー・フェアラーク東京)、1995.12
- 5) たとえば、日本火薬工業会資料編集部：一般火薬学、pp.218, 256、平成3年4月
- 6) たとえば、久保田浪之介：火薬のはなし、日刊工業新聞社、pp.80～83、1996
- 7) IRVINE ISRAEL GRASS (高山和喜訳)：Shock Waves & Man (ショックウェーブ)、丸善、1990.10
- 8) 木村 真：火薬読本 ー新しい火薬の知識と発破技術ー、白亜書房、平成5年6月

## 第3章 材料強度の異なる鋼板に対する成形爆薬の切断能力と発破式

### 3.1 まえがき

鋼板の切断に用いる成形爆薬の爆薬量を求める際、通常用いられている発破式は鋼板の材料強度に関係なく完全に切断しようとする鋼板の断面積にのみ比例する形となっている。すなわち、鋼板の材料強度を無視している。しかし、今日のように鋼構造建物に使用する構造用鋼材の材料強度が高強度化され多様化してきている現状を考慮すると、この発破式は成立しなくなることが大いに予想される。

そこで本章では、成形爆薬による鋼板の切断能力に対し、鋼板の材料強度が影響していることを把握するために、文献3)で得られたSS400鋼材の発破係数を用いて鋼板の切欠き深さを板厚19mmの1/3, 2/3まで切欠く場合と、完全に切断する場合の3種類に制御する成形爆薬を準備し、材料強度が400, 490, 590, 690, 780N/mm<sup>2</sup>級の5種類の鋼板を組合せた実験を行うことにより、成形爆薬による鋼板の切断能力に対して鋼板の材料強度が影響していることを実験的に明らかにする。また、これらの実験結果を基に、材料強度を考慮した発破式を提示する。

### 3.2 既往の発破式

#### 3.2.1 発破式の原点

露天掘りの採鉱や採石現場等で鉱石や岩石を発破で採掘する場合、それらに爆薬を集中的に装填して発破すると円錐形の発破孔(漏斗孔)ができる。この発破孔における装薬(装填した爆薬)の中心から地盤面(自由面)までの最短距離を最小抵抗線という。この一自由面の集中装薬発破においては、1725年にハウザー(Hausser)が経験的に次の発破式<sup>1)</sup>が成立することを発表している。

$$W_{hau} = C_{hau} \cdot D_{hau}^3 \quad \dots \dots \dots (3.2.1)$$

ここで、 $W_{hau}$ :装薬量(kg),  $C_{hau}$ :発破係数(kg/m),  $D_{hau}$ :最小抵抗線(m)を示しており、この発破式をハウザーの式と称して国内で広く用いられている。

なお、最小抵抗線が大きく変化する場合、同式中の発破係数の値は変化し、最小抵抗線が1m付近でよく適合するといわれている。また、岩石は節理、成層、亀裂等のない均質で理想的な状態を仮定している。

#### 3.2.2 鋼材およびコンクリート材料の発破式

鋼材およびコンクリート材料の切断破壊に必要な薬量(爆薬量)を求める場合の発破式は、式(3.2.1)のハウザーの式を変形した次式<sup>1)</sup>が国内で広く用いられている。

$$W_{str} = C_{str} \cdot A_{str} \quad \dots \dots \dots (3.2.2)$$

ここで、 $W_{str}$ :薬量(g),  $C_{str}$ :発破係数(g/cm<sup>2</sup>),  $A_{str}$ :切断しようとする鋼材またはコンクリートの切断面積(cm<sup>2</sup>)を示している。

同式では、薬量は切断しようとする鋼材またはコンクリート材料の切断面積に依存しており、各材料の材料強度は全く考慮されていないことが分かる。なお、文献1)によると、鋼材の切断に用いる爆薬にTNTを用いた場合の発破係数( $C_{str}$ )は張付け法(鋼材の表面に張付ける方法)で $C_{str} = 25 \sim 30$  (g/cm<sup>2</sup>)とされている。

### 3.3 実験計画

#### 3.3.1 使用鋼板およびライナー材について

本実験の試験体は、中低層建物のH形鋼柱を想定し、広幅・中幅系の熱間圧延H形鋼の内、実績の多いフランジ幅、フランジ板厚を考慮することを前提とした。

その結果、板厚19mmで300mm×300mmの正方形鋼板とし、400N/mm<sup>2</sup>級のSS400鋼材(一般構造用鋼材)、490N/mm<sup>2</sup>級のSM490A鋼材(溶接構造用鋼材)、590N/mm<sup>2</sup>級のSA440B鋼材(高性能建築構造用鋼材)、690N/mm<sup>2</sup>級のHITEN690B鋼材(690N/mm<sup>2</sup>級溶接構造用高張力鋼材)および780N/mm<sup>2</sup>級のHITEN780B鋼材(780N/mm<sup>2</sup>級溶接構造用高張力鋼材)の5種類を用意した。また、成形爆薬に使用するライナー材の材質は、第3章と同様に溶融亜鉛めっき鋼板(SGCC)および銅板(C1201P-1/4H)の2種類で、共に板厚0.8mmの薄板を用いることとした。

本実験で用いた各鋼板およびライナー材の機械的性質および化学成分を表3-3-1、3-3-2に示す。

表3-3-1 鋼材およびライナー材の機械的性質

種類	板厚 (mm)	$\sigma_y$		$\sigma_u$		YR (%)	EL (%)	HRB
		(t/cm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(t/cm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )			
鋼板 (SS400)	19	2.67	262	4.38	429	61.0	33	94
鋼板 (SM490A)	19	3.49	342	5.25	515	66.5	29	102
鋼板 (SA440B)	19	4.78	468	6.52	639	73.2	19	110
鋼板 (HITEN690B)	19	7.28	713	7.73	758	94.1	17	112
鋼板 (HITEN780B)	19	8.71	854	9.10	892	95.7	15	115
溶融亜鉛めっき鋼板 (SGCC)	0.8	2.61 <sup>*1</sup>	256 <sup>*1</sup>	3.66	359	71.3	36	77
銅板 (C1201P-1/4H)	0.8	1.76 <sup>*1</sup>	172 <sup>*1</sup>	2.44	239	72.4	38	54

$\sigma_y$ : 降伏応力,  $\sigma_u$ : 引張強度, YR: 降伏比, EL: 伸び, HRB: ロックウェル硬さ (Bスケール),  
\*1: 0.2%オフセット法による

表3-3-2 鋼材およびライナー材の化学成分

種類	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Zn目付量 (両面) (g/m <sup>2</sup> )
	×100 (%)			×1000 (%)		×100 (%)					
SS400 <sup>*2</sup>	15	19	68	10	3	—	—	—	—	—	—
SM490A <sup>*2</sup>	16	36	142	10	2	—	—	—	—	—	—
SA440B <sup>*2</sup>	12	25	137	9	2	18	22	9	13	4	—
HITEN690B <sup>*2</sup>	11	28	95	6	1	21	103	44	32	4	—
HITEN780B <sup>*2</sup>	11	28	95	6	1	21	103	44	32	4	—
SGCC <sup>*3</sup>	2	2	24	19	14	—	—	—	—	—	244
C1201P-1/4H <sup>*3</sup>	—	—	—	20	—	9,998	—	—	—	—	—

\*2: ミルシート値, \*3: 化学成分の分析値

### 3.3.2 実験で用いる成形爆薬の形状と爆薬量の算出

本実験で用いる成形爆薬の形状は、第3章で得られた実験結果を参考に鋼板の切断効果が大いに期待できる形状として、図2-6-1に示す形状係数を $\kappa=0.75$ に、ライナー角を $\alpha=90^\circ$ に設定した。なお、本研究では鋼板を切断する成形爆薬の薬量を求める発破式として、式(3.2.2)と区別するために以下のように設定する。

$$W_{sc} = C_e \cdot A(t) \quad \dots \dots \dots (3.2.3)$$

ここで、 $W_{sc}$ :薬量(g),  $C_e$ :発破係数( $\text{g}/\text{cm}^2$ ),  $A(t)$ :板厚(t)mmの鋼板の切断面積( $\text{cm}^2$ )を示す。成形爆薬の爆薬量(以降、薬量と記す)を求めるための前提条件として、式(3.2.3)に代入する発破係数は、文献3)で実施した試験体のうち、SS400鋼材を用いた数体の平均実績値を採用し、鋼板の材料強度を無視した必要最小限の爆薬量を算出することにした。

以下に、爆薬にペントライトを用いた場合の発破係数と爆薬充填密度の実績値を示す。

発破係数 :  $C_e = 1.674 \text{ (g}/\text{cm}^2)$   
 爆薬充填密度 :  $\rho_e = 1.568 \text{ (g}/\text{cm}^3)$

これらの値を利用し、各鋼板の板厚(全て19mm)の約1/3(6mm)および約2/3(12mm)まで切欠く場合と各鋼板を完全切断(19mm)する場合で、爆薬長370mmの爆薬量を式(3.2.3)で算出すると、以下のように求めることができる。

【①:鋼板を6mmまで切欠く場合】

鋼板の有効幅は300mmであることから、鋼板の切欠き面積( $A_{(6)}$ )を用いて薬量( $W_{sc(6)'}$ )を算出すると、以下のように求まる。

$$W_{sc(6)'} = C_e \cdot A_{(6)} = 30.13 \text{ (g)} \quad \dots \dots \dots (3.2.4)$$

この薬量に対し、 $\rho_e$ と $\kappa$ から爆薬幅( $W_{(6)}$ )と爆薬高さ( $H_{(6)}$ )を求め、爆薬ケースの製作可能な範囲にまとめると、以下のようになる。

$$W_{(6)} = 11.32 \rightarrow 12 \text{ (mm)}, \quad H_{(6)} = 8.49 \rightarrow 9 \text{ (mm)} \quad \dots \dots \dots (3.2.5)$$

実際に使用する爆薬長は370mmであることから、この爆薬長、 $\rho_e$ 、 $\kappa$ および式(3.2.5)の値から、本実験で使用する鋼板を6mmまで切欠く場合の薬量( $W_{sc(6)}$ )は、以下のように求まる。

$$W_{sc(6)} = 41.77 \rightarrow 42 \text{ (g)} \quad \dots \dots \dots (3.2.6)$$

【②:鋼板を12mmまで切欠く場合】

式(3.2.4)と同様に、鋼板の切欠き面積( $A_{(12)}$ )を用いて薬量( $W_{sc(12)'}$ )を算出すると、以下のように求まる。

$$W_{sc(12)'} = C_e \cdot A_{(12)} = 60.27 \text{ (g)} \quad \dots \dots \dots (3.2.7)$$

また、式(3.2.5)と同様に、爆薬幅( $W_{(12)}$ )と爆薬高さ( $H_{(12)}$ )を求めると、以下のようになる。

$$W_{(12)} = 16.01 \rightarrow 16 \text{ (mm)}, \quad H_{(12)} = 12.01 \rightarrow 12 \text{ (mm)} \quad \dots \dots \dots (3.2.8)$$

実際に使用する爆薬長は370mmであることから、式(3.2.6)と同様に、本実験で使用する鋼板を12mmまで切欠く場合の薬量( $W_{sc(12)}$ )は、以下のように求まる。

$$W_{sc(12)} = 74.26 \rightarrow 74 \text{ (g)} \quad \dots \dots \dots (3.2.9)$$

【③：鋼板の19mmを完全に切断する場合】

式(3.2.4)と同様に、鋼板の切断面積( $A_{(19)}$ )を用いて薬量( $W_{sc(19)'}$ )を算出すると、以下のよう  
に求まる。

$$W_{sc(19)'} = C_e \cdot A_{(19)} = 95.42 \text{ (g)} \quad \dots\dots\dots (3.2.10)$$

また、式(3.2.5)と同様に、爆薬幅( $W_{(19)}$ )と爆薬高さ( $H_{(19)}$ )を求めると、以下のようになる。

$$W_{(19)} = 20.14 \rightarrow 20 \text{ (mm)}, \quad H_{(19)} = 15.11 \rightarrow 15 \text{ (mm)} \quad \dots\dots\dots (3.2.11)$$

実際に使用する爆薬長は370mmであることから、式(3.2.6)と同様に、本実験で使用する板厚  
19mmの鋼板を完全に切断する場合の薬量( $W_{sc(19)}$ )は、以下のよう  
に求まる。

$$W_{sc(19)} = 116.03 \rightarrow 117 \text{ (g)} \quad \dots\dots\dots (3.2.12)$$

3.3.3 実験パラメータ

本章では、成形爆薬による鋼板の切断能力に対し、鋼板の材料強度が影響していることを把握す  
ることを目的としているため、実験パラメータは以下のように設定した。

- ①ライナー材の材質の違い(溶融亜鉛めっき鋼板、鋼板の2種類)による鋼板の切欠き深さの把握
- ②爆薬量(薬量)の違い(鋼板を6mmまで切欠く場合：42g、鋼板を12mmまで切欠く場合：74g、  
鋼板19mmを完全に切断する場合：117gの3種類)による鋼板の切欠き深さ・切断制御の把握
- ③鋼板の材料強度の違い(400N/mm<sup>2</sup>級のSS400鋼材、490N/mm<sup>2</sup>級のSM490A鋼材、590N/mm<sup>2</sup>級  
のSA440B鋼材、690N/mm<sup>2</sup>級のHITEN690B鋼材、780N/mm<sup>2</sup>級のHITEN780B鋼材の5種類)に  
よる鋼板の切欠き深さの把握

以上の3項目を設定し、同一パラメータ毎に試験体を3体準備した。なお、SS400鋼材とSM490A  
鋼材の鋼板を完全切断する試験体は1体のみとした。

ここで試験体名称の説明を図3-3-1に、各パラメータの組合せを表3-3-3に示す。

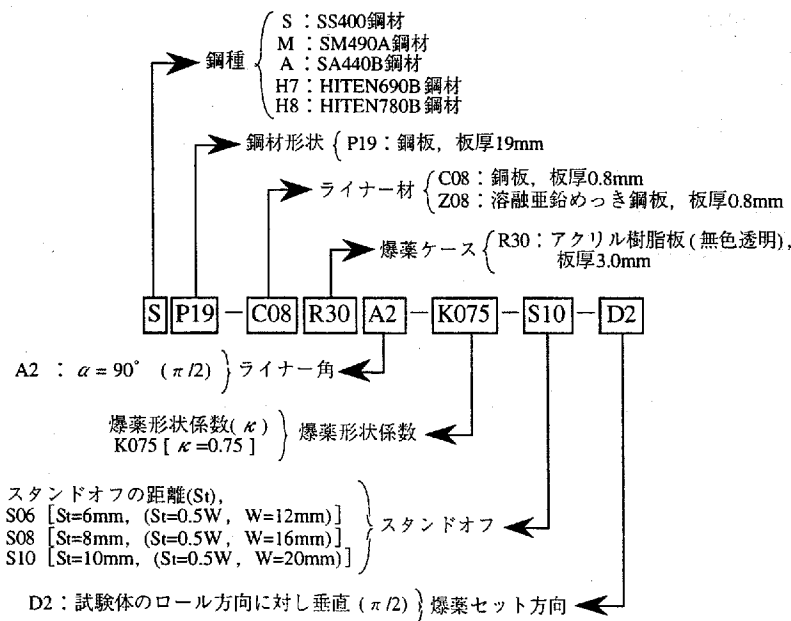


図3-3-1 試験体名称の説明

表 3-3-3 試験体のパラメータおよび組合せ

試験体名称	爆薬ケース	ライナー材	鋼板	$\alpha$	$\kappa$	L (mm)	St (mm)	W (mm)	H (mm)			
SP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1, 2	アクリル樹脂 (無色透明) 板厚：3.0mm	溶融亜鉛 めっき鋼板 T=0.8mm	SS400 t=19.0mm	90°	0.75	370	6	12	9			
SP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3							鋼板 T=0.8mm	8	16	12		
SP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1, 2								10	20	15		
SP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3								6	12	9		
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3								8	16	12		
SP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1, 2								10	20	15		
SP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3		溶融亜鉛 めっき鋼板 T=0.8mm						SM490A t=19.0mm	6	12	9	
SP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1, 2							8		16	12		
SP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3							10		20	15		
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3							6		12	9		
MP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1, 2							鋼板 T=0.8mm		SA440B t=19.0mm	8	16	12
MP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3										10	20	15
MP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1, 2		6	12							9		
MP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3		8	16							12		
MP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3		10	20							15		
MP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1, 2		溶融亜鉛 めっき鋼板 T=0.8mm	HITEN690B t=19.0mm							6	12	9
MP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3							8			16	12	
MP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1, 2							10			20	15	
MP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3							6	12		9		
MP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3							8	16		12		
MP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3							10	20		15		
AP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1, 2		溶融亜鉛 めっき鋼板 T=0.8mm					HITEN780B t=19.0mm	6		12	9	
AP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3								8	16	12		
AP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1, 2								10	20	15		
AP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3								6	12	9		
AP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.1, 2								8	16	12		
AP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3								10	20	15		
AP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1, 2		鋼板 T=0.8mm	HITEN780B t=19.0mm					6	12	9		
AP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3								8	16	12		
AP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1, 2								10	20	15		
AP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3								6	12	9		
AP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.1, 2								8	16	12		
AP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3								10	20	15		
H7P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1, 2		溶融亜鉛 めっき鋼板 T=0.8mm					HITEN780B t=19.0mm	6	12	9		
H7P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3								8	16	12		
H7P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1, 2								10	20	15		
H7P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3								6	12	9		
H7P19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.1, 2								8	16	12		
H7P19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3								10	20	15		
H7P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1, 2		鋼板 T=0.8mm	HITEN780B t=19.0mm					6	12	9		
H7P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3								8	16	12		
H7P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1, 2								10	20	15		
H7P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3								6	12	9		
H7P19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.1, 2								8	16	12		
H7P19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3								10	20	15		
H8P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1, 2		溶融亜鉛 めっき鋼板 T=0.8mm					HITEN780B t=19.0mm	6	12	9		
H8P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3								8	16	12		
H8P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1, 2								10	20	15		
H8P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	6			12	9							
H8P19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.1, 2	8			16	12							
H8P19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3	10			20	15							
H8P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1, 2	鋼板 T=0.8mm	HITEN780B t=19.0mm	6	12	9							
H8P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3			8	16	12							
H8P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1, 2			10	20	15							
H8P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3			6	12	9							
H8P19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.1, 2			8	16	12							
H8P19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3			10	20	15							

$\alpha$  : ライナー角 (頂角),  $\kappa$  : 形状係数 ( $\kappa=H/W$ ), L : 爆薬長, St : スタンドオフ, W : 爆薬幅, H : 爆薬高さ

### 3.3.4 実験方法

本実験のうち、表3-3-3に示すNo.1, No.2試験体については日本化薬(株)厚狭工場内の火薬類性能試験場(山口県厚狭郡山陽町)で、No.3試験体については通商産業省工業技術院資源環境技術総合研究所内の爆発ドーム(茨城県つくば市)で発破実験を行った。

本実験で使用した成形爆薬は、図2-6-1(pp.13)に示すような無色透明の亚克力樹脂板で製作した爆薬ケースに、ペントライトを80℃近くで溶解し、溶融充填したものを6号瞬発電気雷管により起爆した。

成形爆薬の設置方法は鋼板上面に直置きとし、接着剤等は用いなかった。これは、ペントライトの爆轟速度(以後、爆速と記す)が7,470m/secに達することから、反動で飛ぶ心配がないためである。この現象は高速度カメラで撮影し、実験的に確認(詳細は第4章を参照)している。

この成形爆薬と鋼板の設置状況を図3-3-2に示す。

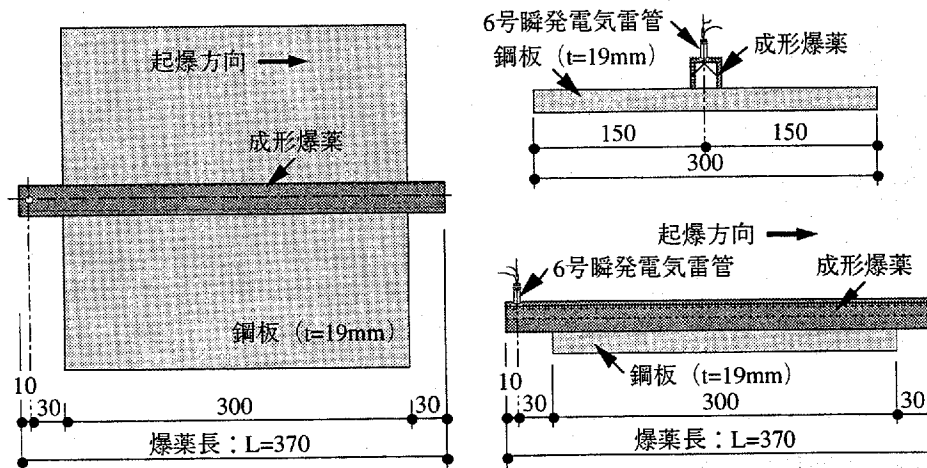


図3-3-2 成形爆薬と鋼板の設置状況

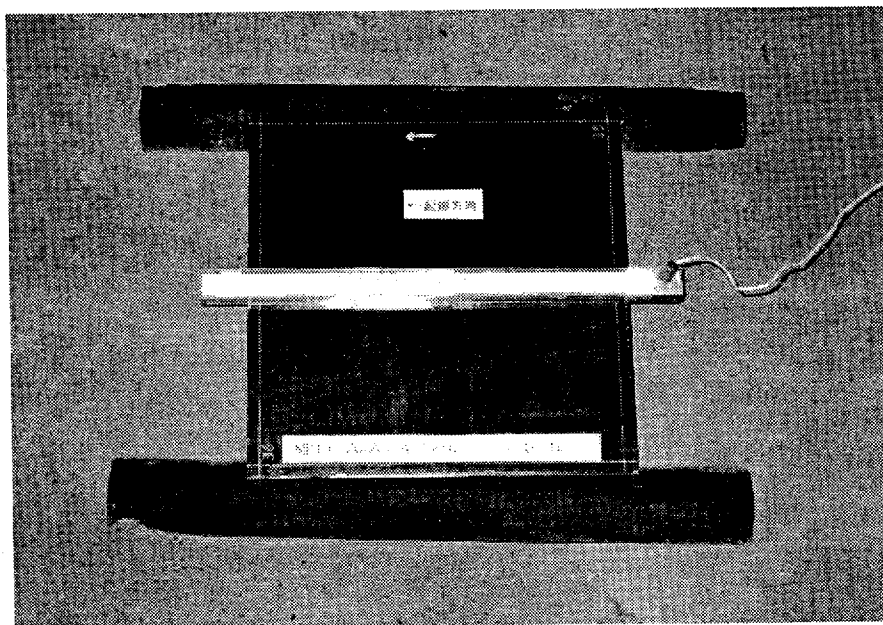


写真3-3-1 成形爆薬と鋼板の設置状況  
(MP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.2 試験体)



## 3.4 実験結果と考察

## 3.4.1 実験結果

本実験で用いた各成形爆薬の計測結果および実験終了後の鋼板の切断・切欠き結果、切断係数を表3-4-1, 2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(文献3)参照)の先端までの長さを表している。また、切断係数とは、鋼板の切断または切欠き深さ(mm)を爆薬の充填密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )で除した値を表しており、この値が大きいほど切断効果が高いことを表している。

表3-4-1, 2内で\*印の付いた切欠き深さの値は、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最小板厚, 最大板厚を示し、充填密度とは、爆薬ケースに爆薬を溶融充填した密度を示している。ただし、切欠き深さの最大値を計測する際、両端部(起爆方向に対する起点と終点)で深く切欠かれた箇所は計測対象から除外している。

また、表3-4-1, 2内の試験体名称でS06の付いた試験体は鋼板の切欠き深さを6mmに、S08の付いた試験体は切欠き深さを12mmに、S10の付いた試験体は完全切断(板厚19mm以上)を想定した試験体である。

表3-4-1 成形爆薬の計測値および実験結果(SS400鋼材, SM490A鋼材)

試験体名称	W <sub>i</sub> (mm)	H <sub>i</sub> (mm)	$\kappa_1$	L <sub>i</sub> (mm)	爆薬量 (g)	充填密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	切欠き深さ [最小値] (mm)	切断係数 [最小値] ( $\text{mm}/(\text{g}/\text{cm}^3)$ )	切欠き深さ [最大値] (mm)	切断係数 [最大値] ( $\text{mm}/(\text{g}/\text{cm}^3)$ )
SP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1	12.10	8.84	0.73	370.0	37.7	1.448	5.49	3.79	6.21	4.28
SP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.2	12.00	8.88	0.74	370.0	38.4	1.471	5.74	3.91	6.23	4.24
SP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3	12.11	8.90	0.73	370.0	41.1	1.562	6.57	4.21	7.03	4.50
SP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1	16.21	12.03	0.74	370.0	72.2	1.509	12.34	8.18	13.19	8.75
SP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.2	16.15	11.80	0.73	370.0	71.1	1.533	11.59	7.56	12.17	7.94
SP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	16.21	11.70	0.72	370.0	72.6	1.583	11.55	7.30	11.92	7.53
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3	20.21	15.25	0.75	370.1	116.2	1.523	18.55*	12.18*	18.80*	12.34*
SP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1	11.99	9.00	0.75	370.0	38.4	1.442	6.20	4.30	6.90	4.79
SP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.2	12.08	9.12	0.75	370.0	43.5	1.595	6.90	4.33	7.42	4.65
SP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3	12.08	9.04	0.75	370.0	43.3	1.609	6.49	4.03	6.93	4.31
SP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1	16.16	12.01	0.74	370.0	70.8	1.486	12.29	8.27	13.33	8.97
SP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.2	16.03	11.99	0.75	370.0	69.7	1.472	12.97	8.81	13.41	9.11
SP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	16.03	11.90	0.74	370.0	70.4	1.504	12.32	8.19	13.11	8.72
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3	20.70	14.77	0.71	370.0	118.0	1.606	18.40*	11.46*	18.50*	11.52*
MP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1	11.92	8.92	0.75	370.0	40.0	1.527	5.22	3.42	5.75	3.77
MP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.2	12.08	9.03	0.75	370.0	38.5	1.433	5.67	3.96	6.05	4.22
MP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3	12.15	8.86	0.73	370.0	39.7	1.517	5.47	3.61	5.87	3.87
MP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1	16.00	11.81	0.74	370.0	70.2	1.518	10.68	7.03	11.86	7.81
MP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.2	15.98	11.84	0.74	370.0	71.8	1.548	10.51	6.79	11.88	7.67
MP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	16.03	11.91	0.74	370.0	69.8	1.489	10.59	7.11	11.13	7.47
MP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3	20.09	14.88	0.74	370.0	115.9	1.582	15.36	9.71	18.29*	11.56*
MP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1	12.10	8.95	0.74	370.0	41.7	1.572	6.04	3.84	6.79	4.32
MP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.2	12.10	8.94	0.74	370.0	41.8	1.578	6.33	4.01	6.84	4.33
MP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3	12.00	9.01	0.75	370.0	41.0	1.536	5.94	3.87	6.34	4.13
MP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1	16.08	12.12	0.75	370.0	69.9	1.450	12.09	8.34	12.51	8.63
MP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.2	16.07	12.06	0.75	370.0	71.9	1.504	11.70	7.78	13.04	8.67
MP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	16.06	12.02	0.75	370.0	73.4	1.543	11.91	7.72	12.63	8.18
MP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3	20.15	14.80	0.73	370.0	112.9	1.551	18.19*	11.73*	18.33*	11.82*

W<sub>i</sub>: 爆薬幅[実測値], H<sub>i</sub>: 爆薬高さ[実測値],  $\kappa_1$ : 形状係数[実測値], L<sub>i</sub>: 爆薬長[実測値], \*: 鋼板板厚の最大・最小値を示す

表 3-4-2 成形爆薬の計測値および実験結果 (SA440B 鋼材, HITEN690B 鋼材, HITEN780B 鋼材)

試験体名称	W <sub>i</sub> (mm)	H <sub>i</sub> (mm)	$\kappa_1$	L <sub>i</sub> (mm)	爆薬量 (g)	充填密度 (g/cm <sup>3</sup> )	切欠き深さ [最小値] (mm)	切断係数 [最小値] (mm/(g/cm <sup>3</sup> ))	切欠き深さ [最大値] (mm)	切断係数 [最大値] (mm/(g/cm <sup>3</sup> ))
AP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1	12.20	8.70	0.71	370.3	41.5	1.626	4.53	2.79	5.73	3.52
AP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.2	12.20	8.85	0.73	370.3	40.3	1.538	4.85	3.15	5.79	3.76
AP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3	12.20	8.80	0.72	370.2	40.5	1.560	5.51	3.53	5.80	3.72
AP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1	16.10	11.80	0.73	370.2	70.1	1.513	9.24	6.11	10.25	6.78
AP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.2	16.10	11.70	0.73	370.2	71.3	1.559	9.86	6.33	10.79	6.92
AP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	16.15	11.65	0.72	370.1	70.7	1.554	10.15	6.53	10.36	6.67
AP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.1	20.00	15.15	0.76	370.2	117.9	1.569	16.37	10.43	19.31*	12.31*
AP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.2	20.25	15.10	0.75	370.2	119.4	1.587	15.04	9.48	19.36*	12.20*
AP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3	20.15	15.15	0.75	370.3	120.0	1.591	12.52	7.87	19.33*	12.15*
AP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1	12.25	8.90	0.73	370.3	40.8	1.541	5.22	3.39	5.90	3.83
AP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.2	12.00	8.75	0.73	370.3	37.8	1.480	4.79	3.24	5.71	3.86
AP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3	12.05	8.80	0.73	370.3	40.1	1.553	5.12	3.30	6.04	3.89
AP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1	16.30	11.85	0.73	370.2	72.9	1.554	9.93	6.39	11.58	7.45
AP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.2	16.20	11.80	0.73	370.2	71.7	1.543	10.51	6.81	11.91	7.72
AP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	16.20	11.85	0.73	370.2	71.3	1.524	10.14	6.65	11.69	7.67
AP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.1	20.20	15.00	0.74	370.1	119.0	1.600	16.67	10.42	19.37*	12.11*
AP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.2	20.00	15.10	0.76	370.1	119.4	1.597	16.86	10.56	19.35*	12.12*
AP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3	20.20	14.80	0.73	370.1	118.1	1.620	13.76	8.49	19.32*	11.92*
H7P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1	12.60	8.75	0.69	370.1	40.5	1.551	4.38	2.82	5.07	3.27
H7P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.2	12.05	8.65	0.72	370.3	40.2	1.598	4.33	2.71	4.81	3.01
H7P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3	12.00	8.75	0.73	370.2	40.1	1.570	4.65	2.96	4.93	3.14
H7P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1	16.10	11.75	0.73	370.3	72.9	1.583	8.35	5.27	9.99	6.31
H7P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.2	16.05	11.85	0.74	370.3	70.3	1.509	8.82	5.84	9.81	6.50
H7P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	16.05	11.70	0.73	370.1	70.3	1.540	8.32	5.40	9.85	6.40
H7P19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.1	20.00	15.15	0.76	370.1	120.2	1.600	15.60	9.75	18.87*	11.80*
H7P19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.2	20.10	15.25	0.76	370.2	117.8	1.548	14.59	9.42	16.81*	10.86*
H7P19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3	20.10	15.10	0.75	370.2	119.5	1.594	15.32	9.61	17.45	10.95
H7P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1	12.25	8.70	0.71	370.2	39.6	1.549	4.60	2.97	5.46	3.53
H7P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.2	12.10	8.70	0.72	370.4	39.3	1.545	5.12	3.31	5.64	3.65
H7P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3	12.10	8.70	0.72	370.2	40.3	1.585	5.05	3.19	5.80	3.66
H7P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1	16.15	11.80	0.73	370.2	73.8	1.590	8.92	5.61	10.64	6.69
H7P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.2	16.10	11.65	0.72	370.2	71.0	1.562	10.10	6.46	11.15	7.14
H7P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	16.10	11.90	0.74	370.2	77.7	1.655	9.63	5.82	10.90	6.58
H7P19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.1	20.15	15.05	0.75	370.1	117.9	1.579	15.69	9.94	16.07	10.18
H7P19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.2	20.10	15.20	0.76	370.1	119.9	1.584	15.32	9.67	17.29	10.92
H7P19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3	20.10	15.15	0.75	370.3	120.2	1.595	14.24	8.93	18.91*	11.86*
H8P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1	12.00	8.85	0.74	370.2	41.2	1.585	3.80	2.40	4.73	2.98
H8P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.2	12.20	8.70	0.71	370.1	42.9	1.681	3.78	2.25	4.45	2.65
H8P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3	12.00	8.70	0.73	370.2	40.8	1.611	3.97	2.46	4.45	2.76
H8P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1	16.10	11.80	0.73	370.3	73.7	1.590	8.19	5.15	9.42	5.92
H8P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.2	16.00	11.80	0.74	370.2	67.5	1.461	8.08	5.53	8.70	5.95
H8P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	16.10	11.80	0.73	370.2	70.5	1.521	8.25	5.42	9.43	6.20
H8P19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.1	20.05	15.00	0.75	370.1	119.8	1.617	14.03	8.68	15.58	9.64
H8P19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.2	20.10	15.10	0.75	370.2	119.8	1.598	14.38	9.00	16.18	10.12
H8P19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3	20.20	15.15	0.75	370.3	120.2	1.591	10.91	6.86	16.53	10.39
H8P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1	12.05	8.65	0.72	370.2	40.2	1.599	3.68	2.30	4.70	2.94
H8P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.2	12.05	8.80	0.73	370.3	42.2	1.634	4.72	2.89	5.39	3.30
H8P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3	12.20	8.85	0.73	370.2	40.7	1.554	5.01	3.22	5.15	3.31
H8P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1	16.15	11.70	0.72	370.2	68.9	1.504	8.52	5.66	9.90	6.58
H8P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.2	16.10	11.70	0.73	370.2	69.6	1.521	8.28	5.44	9.06	5.96
H8P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	16.20	11.75	0.73	370.1	69.6	1.508	8.07	5.35	9.83	6.52
H8P19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.1	20.00	15.00	0.75	370.0	120.8	1.633	15.17	9.29	16.42	10.06
H8P19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.2	20.15	15.10	0.75	370.3	116.8	1.556	15.53	9.98	16.34	10.50
H8P19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3	20.15	14.95	0.74	370.1	118.4	1.602	6.97	4.35	15.82	9.88

W<sub>i</sub>: 爆薬幅[実測値], H<sub>i</sub>: 爆薬高さ[実測値],  $\kappa_1$ : 形状係数[実測値], L<sub>i</sub>: 爆薬長[実測値], \*: 鋼板板厚の最大・最小値を示す

### 3.4.2 鋼板の材料強度の違いによる切欠き深さ分布

表3-4-1, 2に示すNo.3試験体のうち、板厚の約1/3(6mm)まで切欠いたS06シリーズおよび板厚の約2/3(12mm)まで切欠いたS08シリーズにおける鋼板の切欠き深さ分布を図3-4-1～5に示す。なお、図3-4-1はSS400鋼材を、図3-4-2はSM490A鋼材を、図3-4-3はSA440B鋼材を、図3-4-4はHITEN690B鋼材を、図3-4-5はHITEN780B鋼材を用いた場合の切欠き深さ分布である。

図3-4-1に示すSS400鋼材の場合の切欠き深さは、ライナー材の材質に関係なく切欠き深さ6mm, 12mm共に十分制御できていることが確認できる。これは、成形爆薬の薬量を求める際、SS400鋼材の実績値から求めた発破係数を用いて決定したことに依存しており、妥当な値であることが確認できた。

図3-4-2に示すSM490A鋼材の場合の切欠き深さは、ライナー材に鋼板を用いた切欠き深さ6mm, 12mmはほぼ制御できているものの、ライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用いた切欠き深さは共に想定値を下回る傾向にある。

図3-4-3～5に示すSA440B鋼材, HITEN690B鋼材およびHITEN780B鋼材の場合の切欠き深さは、ライナー材の材質に関係なく切欠き深さ6mm, 12mm共に想定値を下回る傾向にあり、高強度鋼材になるにつれ顕著な差が表われていることが確認できる。

これら切欠き分布の結果から、成形爆薬による鋼板の切欠き深さはライナー材の材質に関係なく、鋼板の材料強度の影響を受けているものと考えられる。

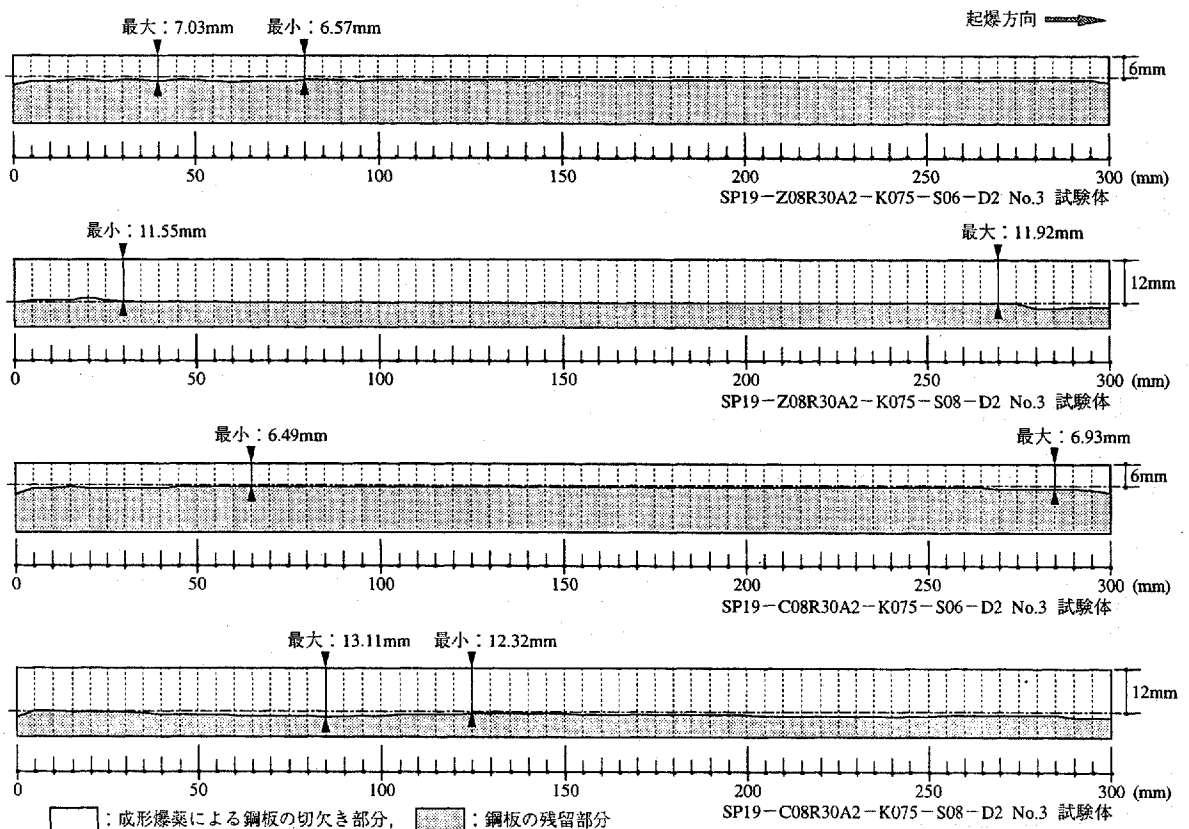


図3-4-1 鋼板の切欠き深さ分布 (SS400鋼材)

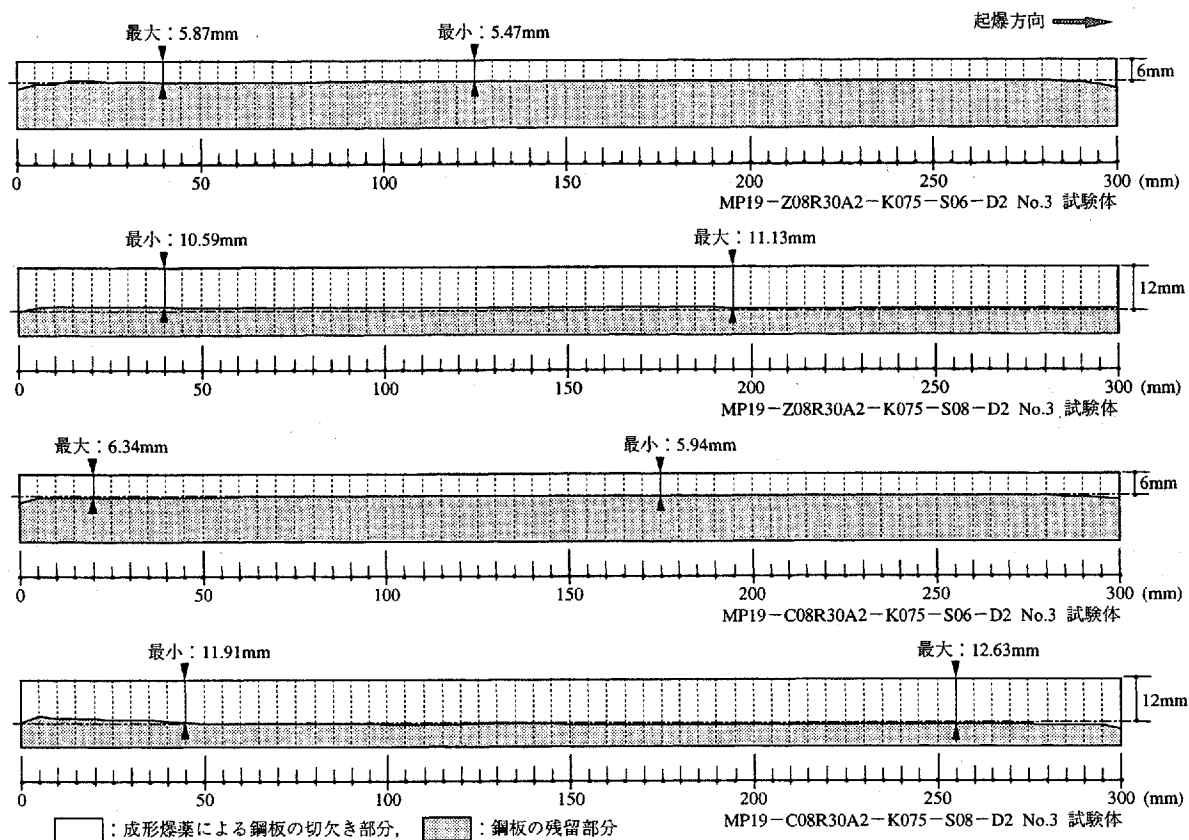


図 3-4-2 鋼板の切欠き深さ分布 (SM490A 鋼材)

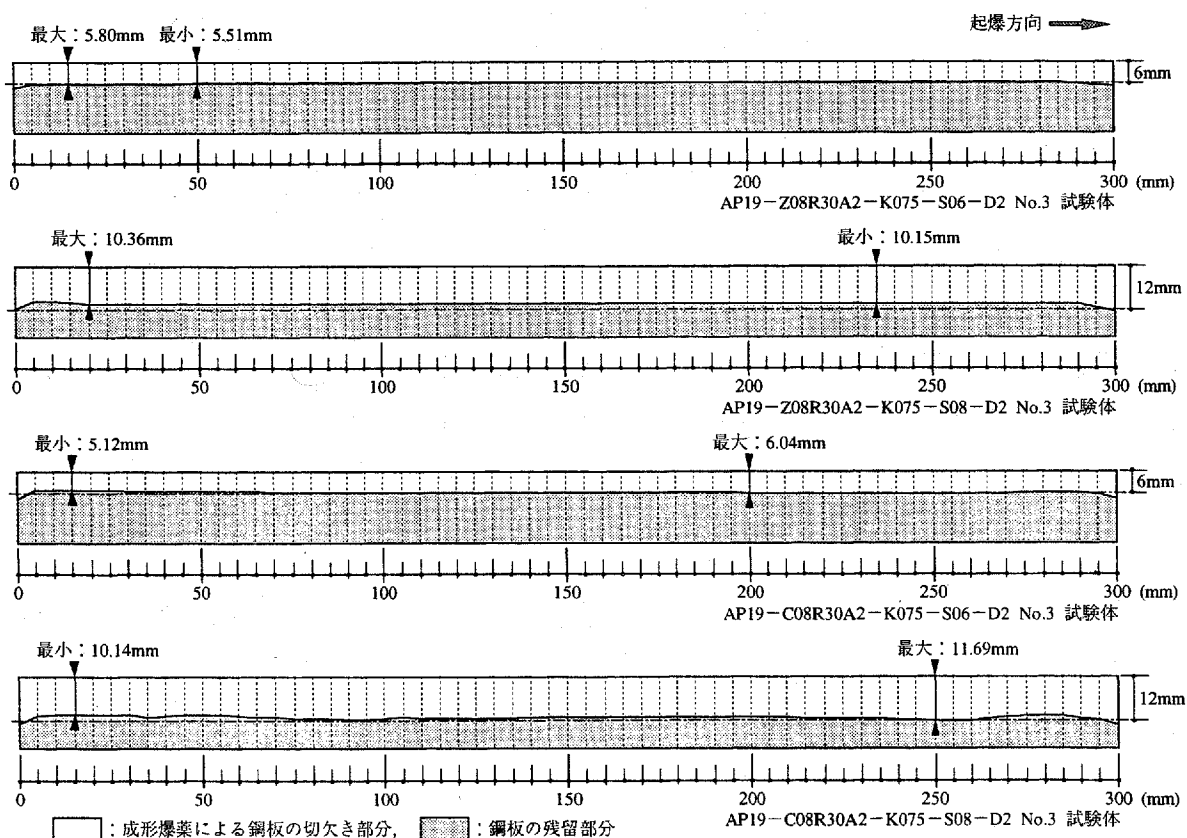


図 3-4-3 鋼板の切欠き深さ分布 (SA440B 鋼材)

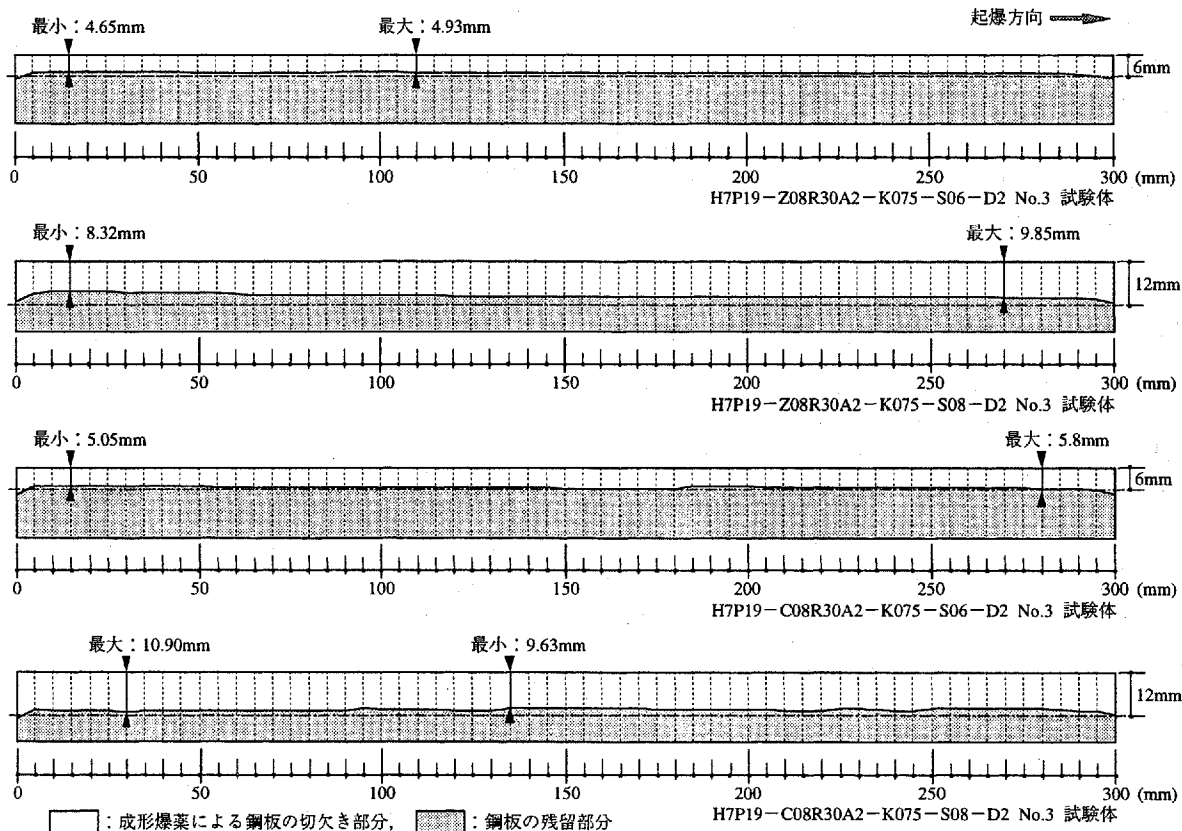


図3-4-4 鋼板の切欠き深さ分布 (HITEN690B 鋼材)

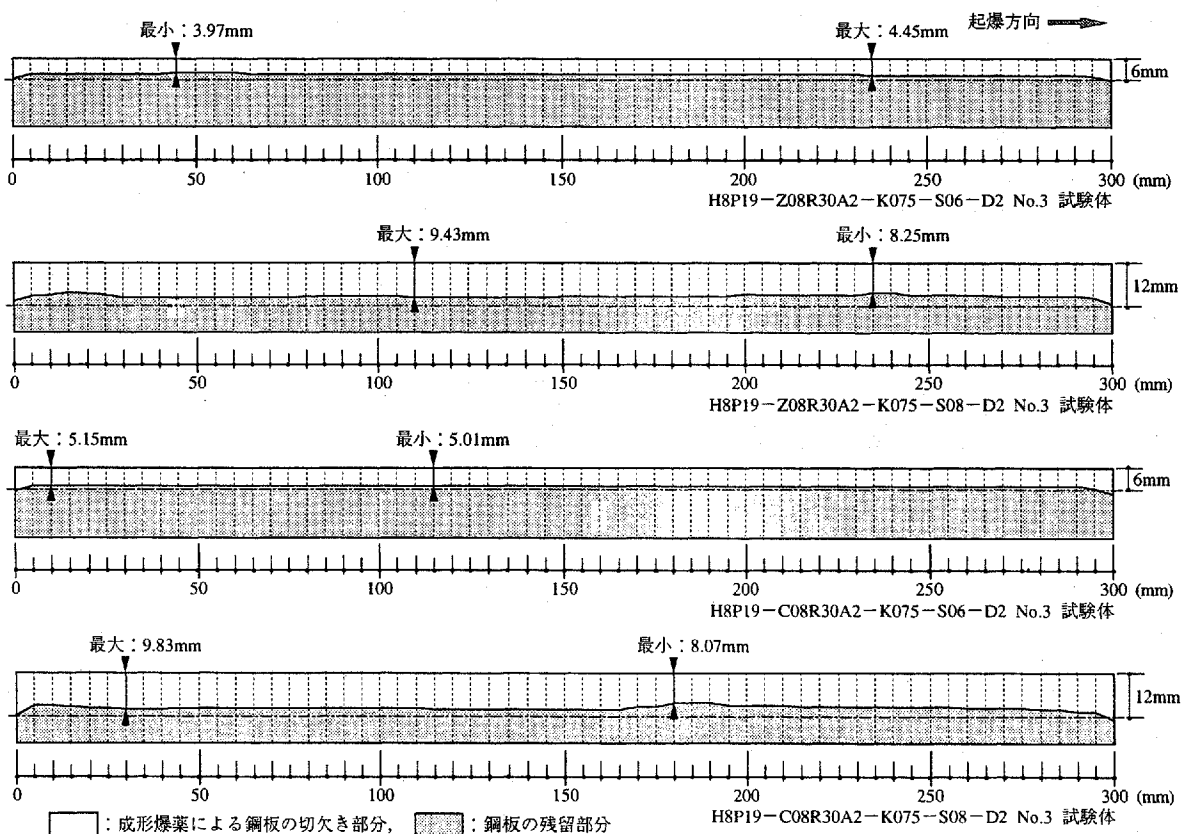


図3-4-5 鋼板の切欠き深さ分布 (HITEN780B 鋼材)

### 3.4.3 鋼板の材料強度の違いによる切欠き深さの比較

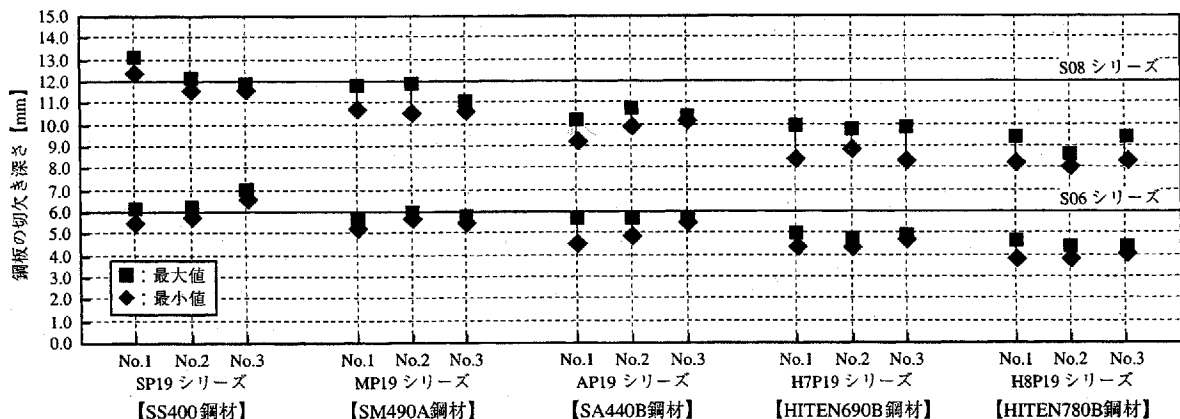
表3-4-1, 2に示す切欠き試験体(完全切断のS10シリーズを除く)について、鋼板の材料強度毎に切欠き深さを比較したものを図3-4-6(a), (b)に示す。同図中、(a)はライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用いた場合を、(b)は銅板を用いた場合を示している。また、S06シリーズは切欠き深さを6mmに、S08シリーズは切欠き深さを12mmに想定したものである。

同図から、ライナー材の材質および鋼板の材料強度に関係なく、同一パラメータ内の切欠き深さが個々に異なっていることが確認できる。この現象は、表3-4-1, 2を見ると分かるように、個々の爆薬量が異なっていることに依存しているものと思われる。

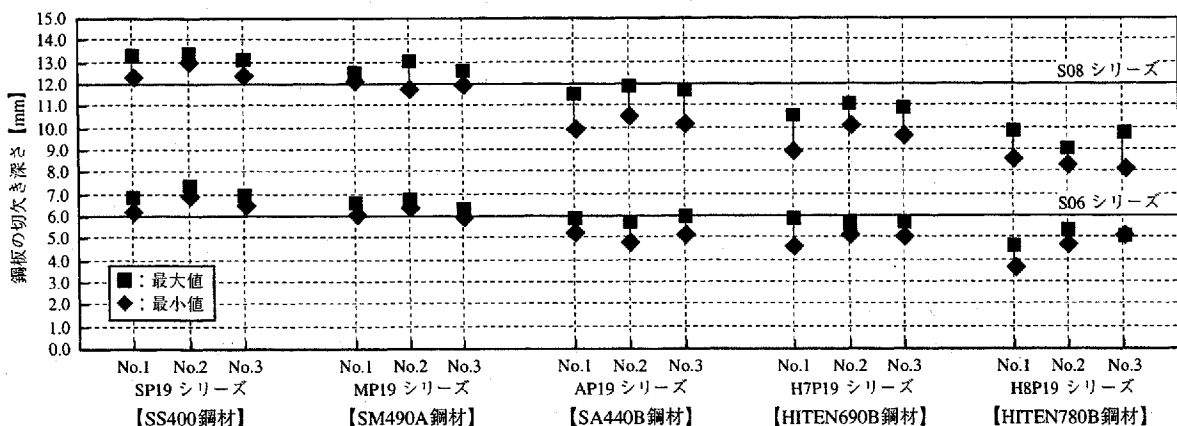
そこで、同一パラメータ3体(No.1~3)内の切欠き深さの最大値および最小値を選択して同一試験体の差とし、鋼板の材料強度の違いによる切欠き深さを比較したものを図3-4-7(a), (b)に示す。同図中の(a), (b)は、図3-4-6と同様である。

図3-4-7(b)から、ライナー材に銅板を用いた場合の切欠き深さは、SM490A鋼材(490N/mm<sup>2</sup>鋼)まではS06, S08シリーズ共に想定値を上回る傾向にある。一方、図3-4-7(a)から、ライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用いた場合の切欠き深さは、SS400鋼材(400N/mm<sup>2</sup>鋼)の切欠き深さの最大値は各想定値を上回る傾向にあるものの、最小値は鋼材の材料強度に関係なく、各想定値を下回る傾向にある。(図3-4-1~5参照)

なお、ライナー材の材質に関係なく、鋼板の材料強度が高くなるにつれ切欠き深さはほぼ直線的に減少する傾向が見られることから、切欠き深さは鋼材の材料強度の影響を受けているものと考えられる。

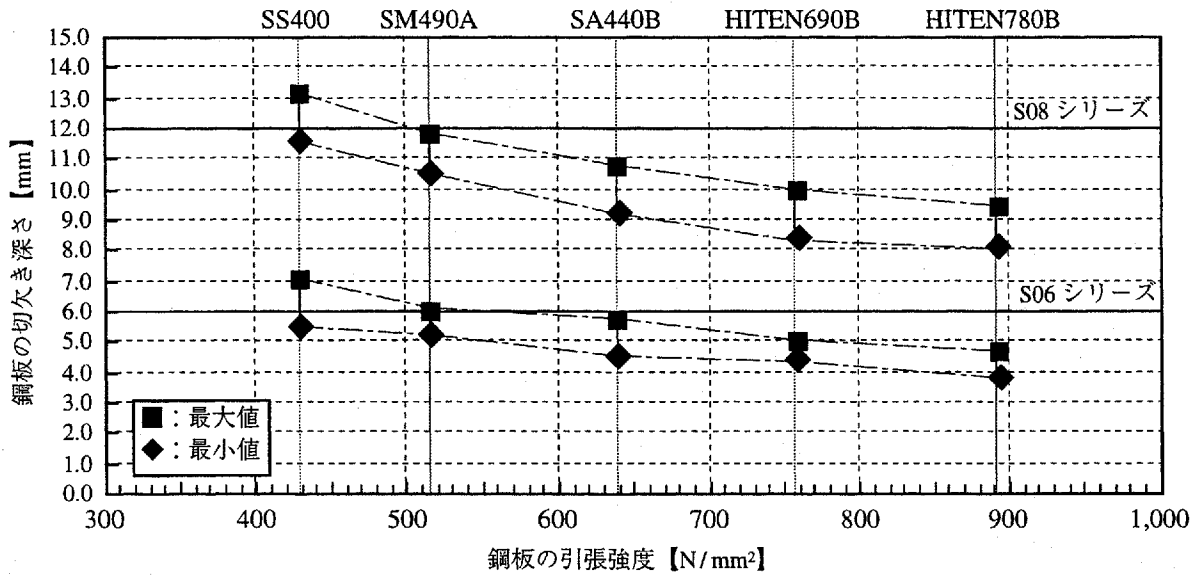


(a) ライナー材が溶融亜鉛めっき鋼板の場合

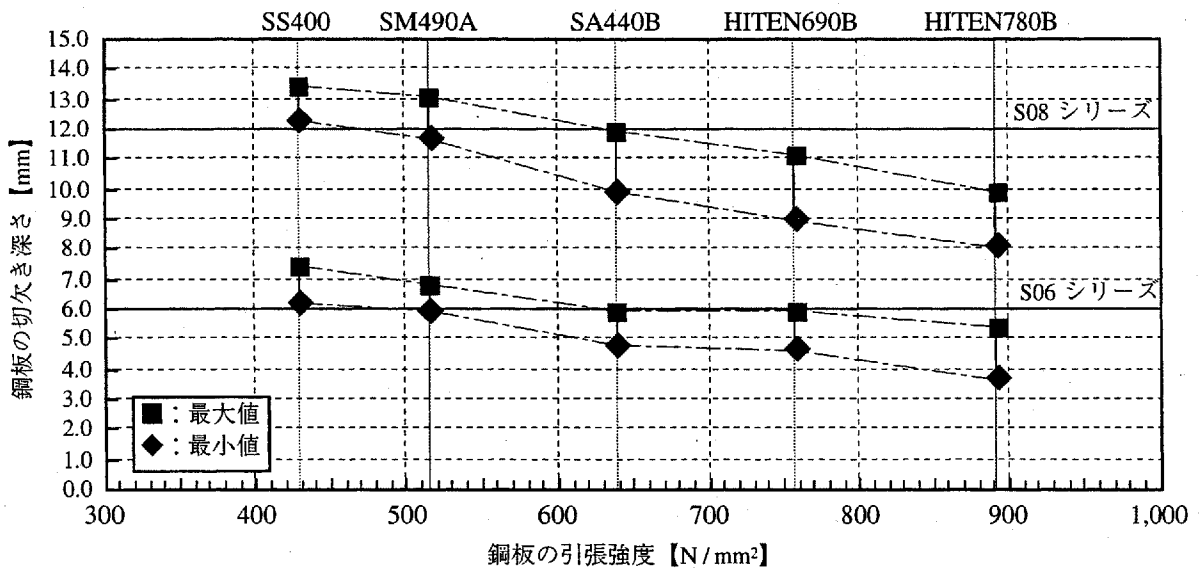


(b) ライナー材が銅板の場合

図3-4-6 切欠き試験体の切欠き深さ



(a) ライナー材が溶融亜鉛めっき鋼板の場合



(b) ライナー材が鋼板の場合

図 3-4-7 鋼板の材料強度の違いによる切欠き深さの比較

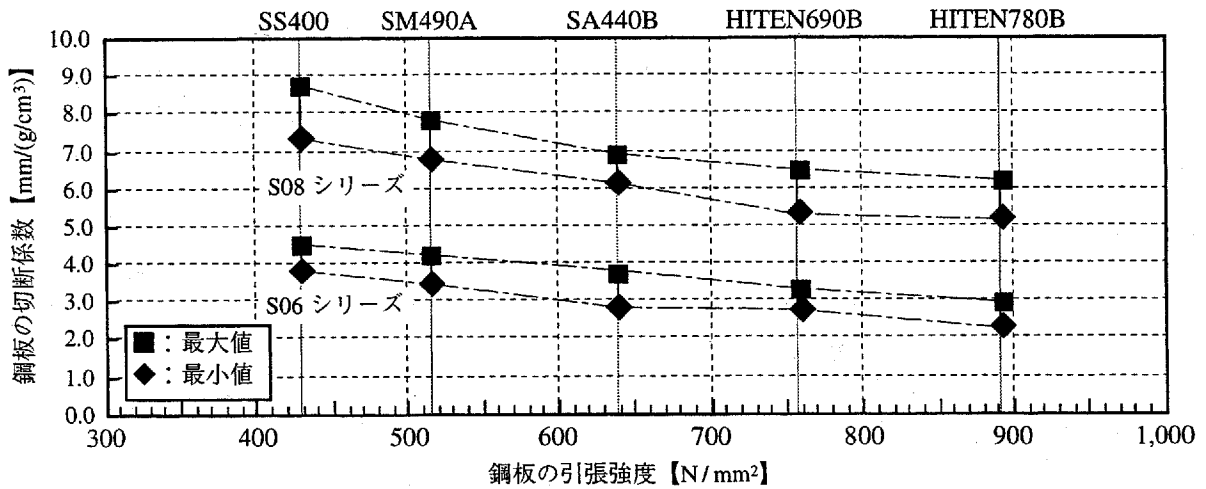
### 3.4.4 鋼板の材料強度の違いによる切断係数の比較

鋼板の材料強度の違いによる切断係数を比較したものを図3-4-8(a), (b)に示す。ここで切断係数とは、鋼板の切断または切欠き深さ(mm)を爆薬の充填密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )で除した値を表している。なお、図3-4-6(a), (b)からも分かるように、同一パラメータの試験体内においても個々の爆薬量の違いによって異なる傾向にある。したがって、前節と同様に表3-4-1, 2に示す実験結果から、同一パラメータ3体内の最大値および最小値を選択して同一試験体における切断係数の差とした。

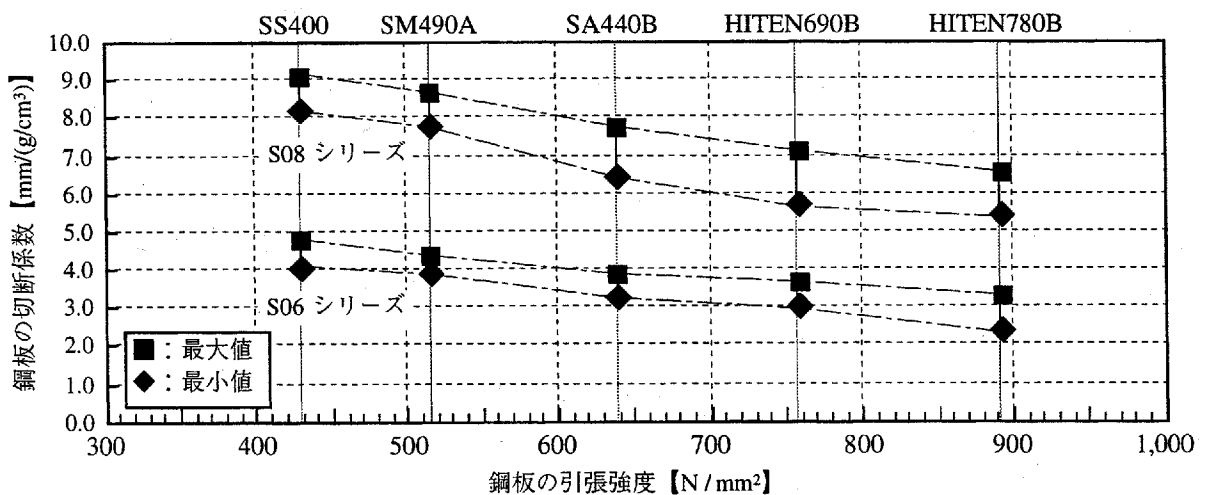
ここで切断係数によって比較する理由は、文献<sup>1), 2)</sup>にも示されているように、爆薬の充填密度の違いが爆轟速度に影響を与え、衝撃破壊力に大きく左右するためである。

図3-4-8(a), (b)から、ライナー材の材質の違いによる鋼板の切断係数を同一条件で比較すると、鋼板を用いた場合の切断係数は溶融亜鉛めっき鋼板の場合の切断係数に比べて大きく、鋼板の切断効果が高くなる傾向が見られる。

なお、ライナー材の材質に関係無く、鋼板の材料強度が高くなるにつれ、切断係数は小さくなる傾向が見られることから、前節と同様に切断係数は鋼材の材料強度の影響を受けているものと考えられる。



(a) ライナー材が溶融亜鉛めっき鋼板の場合



(b) ライナー材が鋼板の場合

図3-4-8 鋼板の材料強度の違いによる切断係数の比較



3.4.5 ライナー材の材質、鋼板の材料強度および切欠き深さの違いによる硬度分布の比較

成形爆薬を構成しているライナー材の材質および鋼板の切断および切欠き深さの違いによる鋼板の衝撃特性を把握するため、表3-4-1～2内のNo.3試験体を用い、図3-4-9に示す試験箇所断面における鋼板の硬度試験として、JIS Z 2244によるピッカース硬さ試験(試験荷重=98.07N)を(株)日鐵テクノロジー関西事業所のピッカース硬度計(DKV-1;松沢精機(株)製)で実施した。なお、この試験箇所は、これまでの研究結果<sup>3), 4)</sup>(第4章の図4-3-2参照)から定常爆速(定常爆轟状態;約7,000m/sec)で、切欠き深さも一定となる箇所(図3-4-1～5)を選定した。

硬度試験に用いる鋼板は、JIS規格および高炉メーカーの社内規格において化学成分の規定種類が多いSM490A鋼材, SA440B鋼材, HITEN690B鋼材およびHITEN780B鋼材を用いることとし、衝撃力の大きい完全切断および板厚の約2/3(12mm)まで切欠いた場合の2種類とした。なお、これらの鋼板は、第4章で実施する化学成分の分析に用いる鋼板と同一である。

これら硬度試験結果を硬度分布として図化したものが図3-4-10～15の(a), (b)である。各図の(a)は鋼板板厚の約2/3(12mm)まで切欠いた場合の硬度分布を、(b)は鋼板(19mm)を完全に切断した場合の硬度分布を示している。また、図3-4-10～11は鋼板の材料強度の違いによる硬度分布の比較を、図3-4-12～15はライナー材の材質の違い(●印はライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を、■印はライナー材に鋼板を用いた場合の硬度試験結果を表している)による硬度分布の比較を行ったものである。

図3-4-10～11から、成形爆薬により衝撃力を受けた鋼板の硬度分布は、ライナー材の材質、鋼板の材料強度、鋼板の切欠き深さに関係なく、切欠き面または切断面近傍の硬度が最も高くなる傾向にあり、鋼板の材料強度が高くなるにつれ、切欠き面または切断面近傍以外の硬度変化は緩やかで、ほぼ一定となる傾向が確認できる。また、ライナー材の材質の違いで切欠き面または切断面近傍の硬度を比較すると、鋼板の切欠きまたは完全切断に関係なく、ライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用いた試験体は鋼板を用いた試験体よりも高く、局部的に硬度が変化していることが確認できる。したがって、成形爆薬の爆轟により鋼板が受ける衝撃力は、ライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用いた方が局部的に集中する傾向にあるものと判断できる。

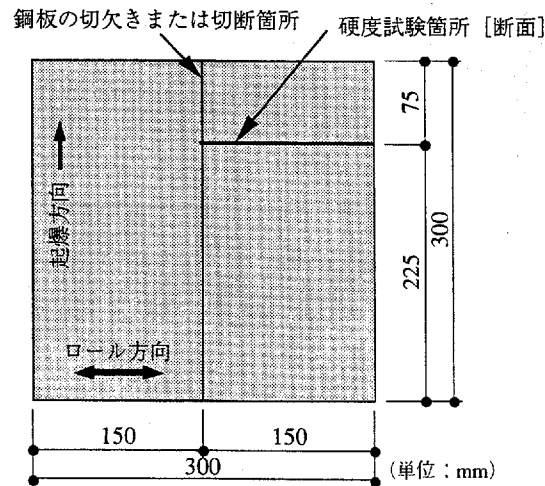
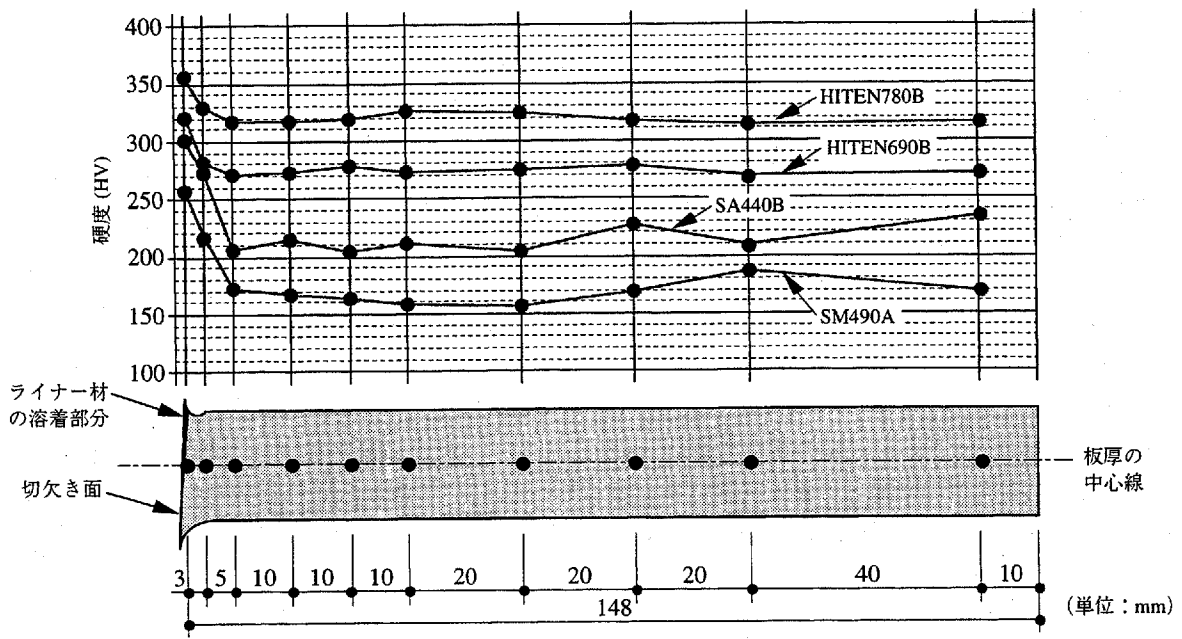
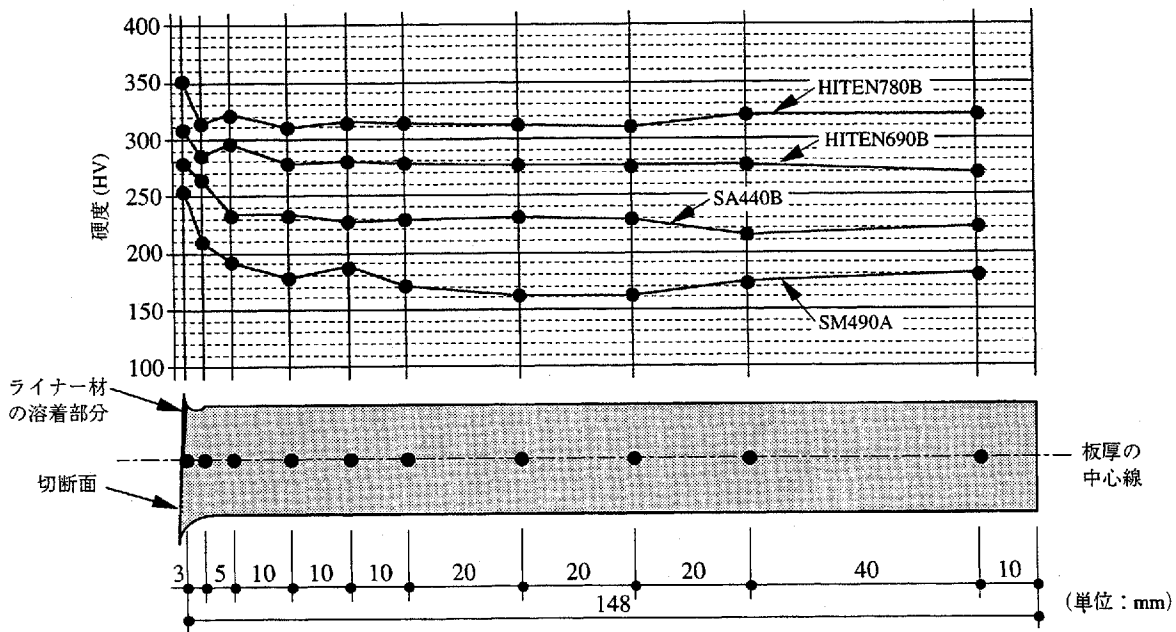


図3-4-9 実験終了後の鋼板を用いた硬度試験の実施箇所

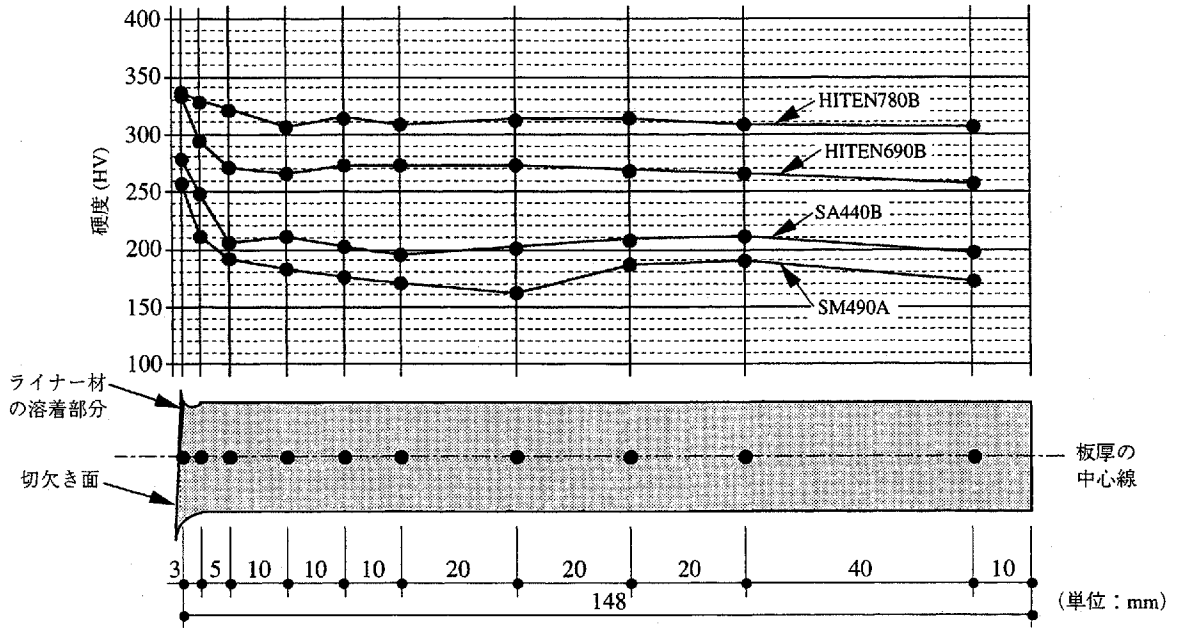


(a) 鋼板板厚の約2/3(12mm)まで切欠いた場合

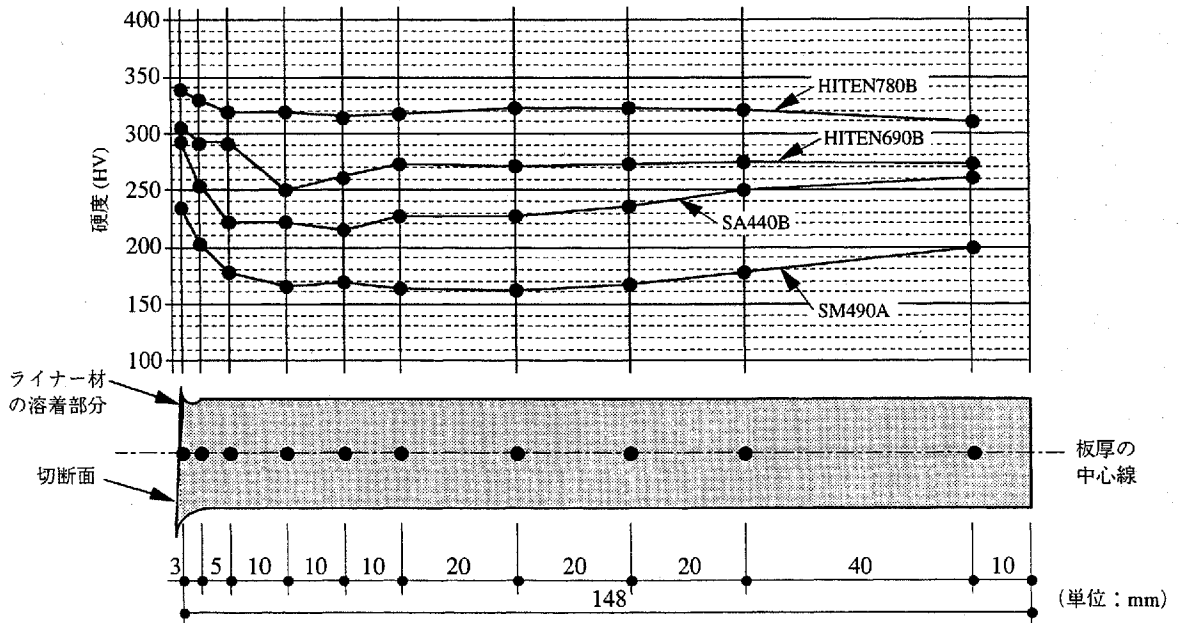


(b) 鋼板(19mm)を完全に切断した場合

図3-4-10 鋼板の材料強度の違いによる硬度分布 (ライナー材が溶融亜鉛めっき鋼板)

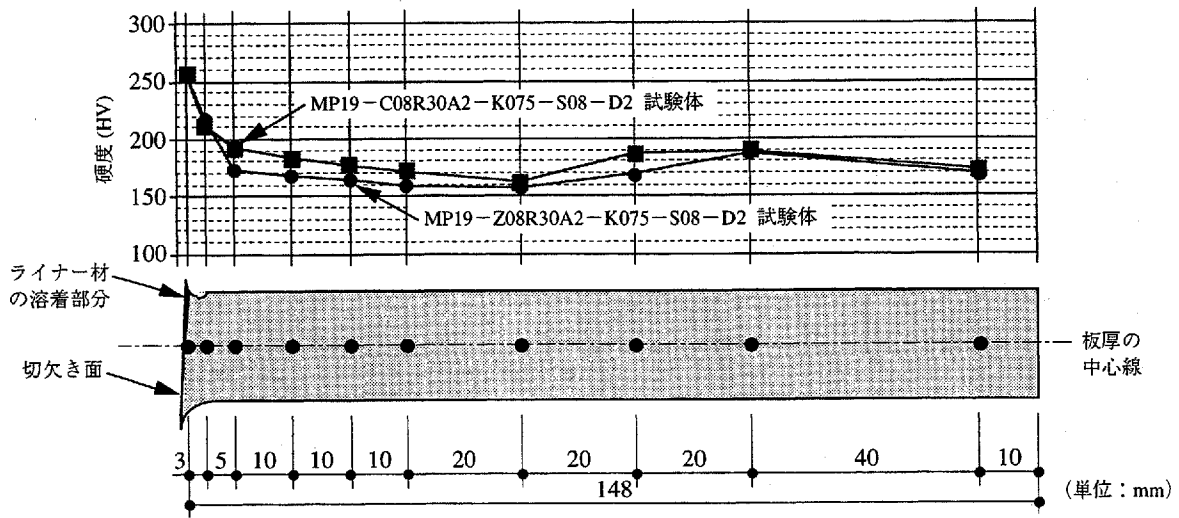


(a) 鋼板板厚の約2/3(12mm)まで切欠いた場合

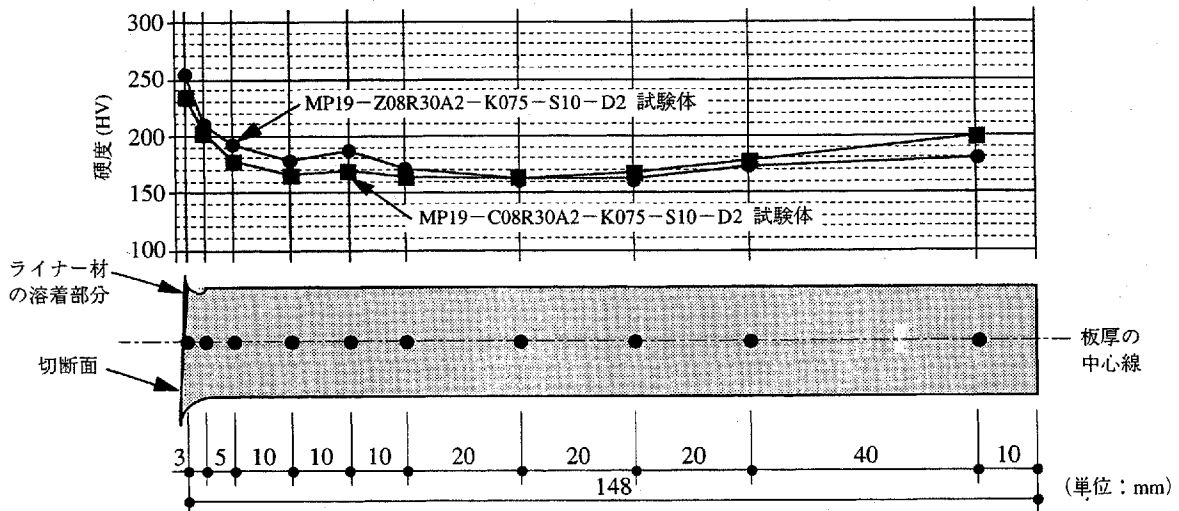


(b) 鋼板(19mm)を完全に切断した場合

図3-4-11 鋼板の材料強度の違いによる硬度分布 (鋼板)

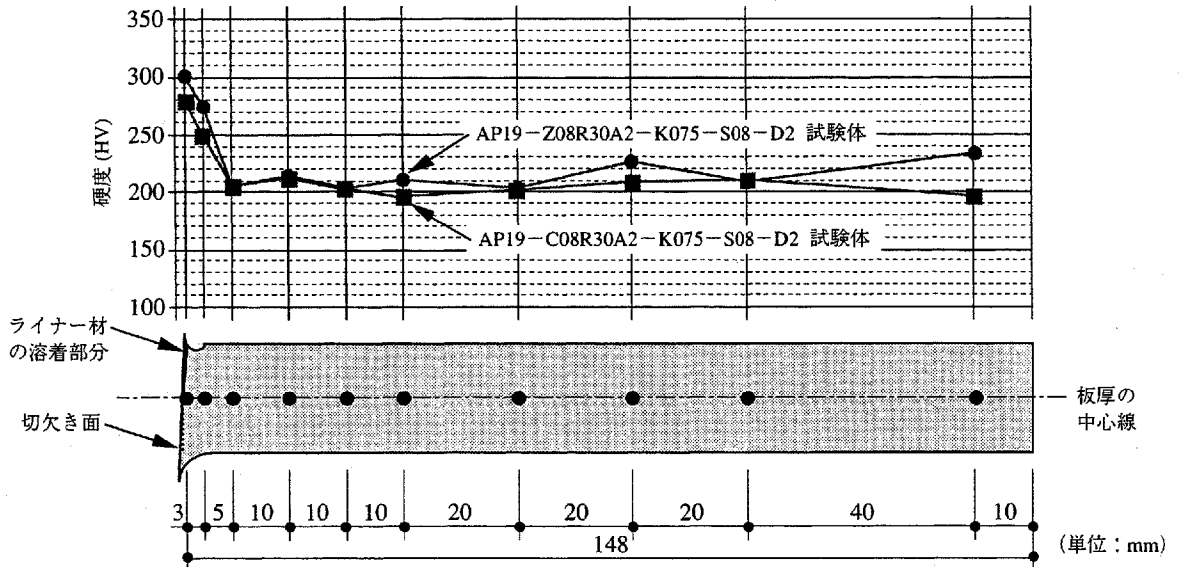


(a) 鋼板板厚の約 2/3(12mm)まで切欠いた場合

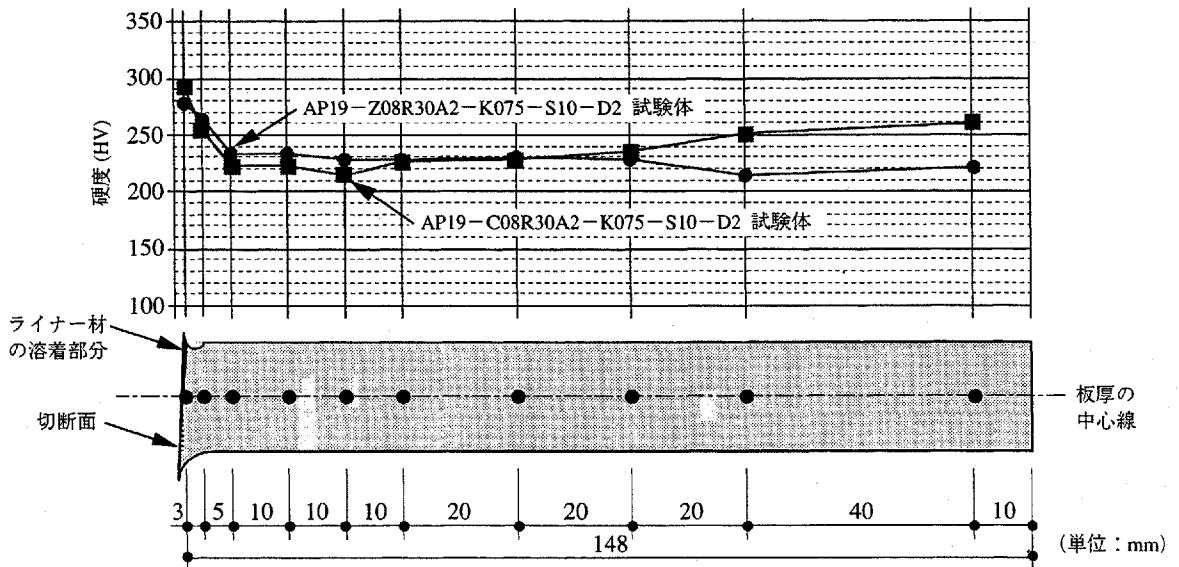


(b) 鋼板(19mm)を完全に切断した場合

図 3-4-12 ライナー材の材質の違いによる硬度分布 (SM490A 鋼材の場合)

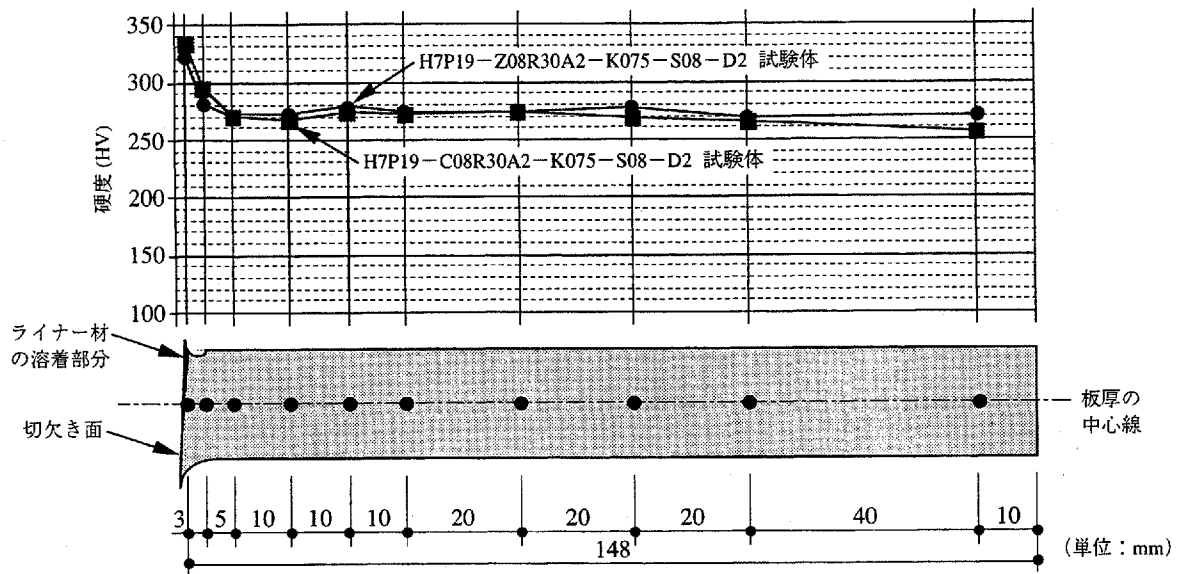


(a) 鋼板板厚の約 2/3(12mm)まで切欠いた場合

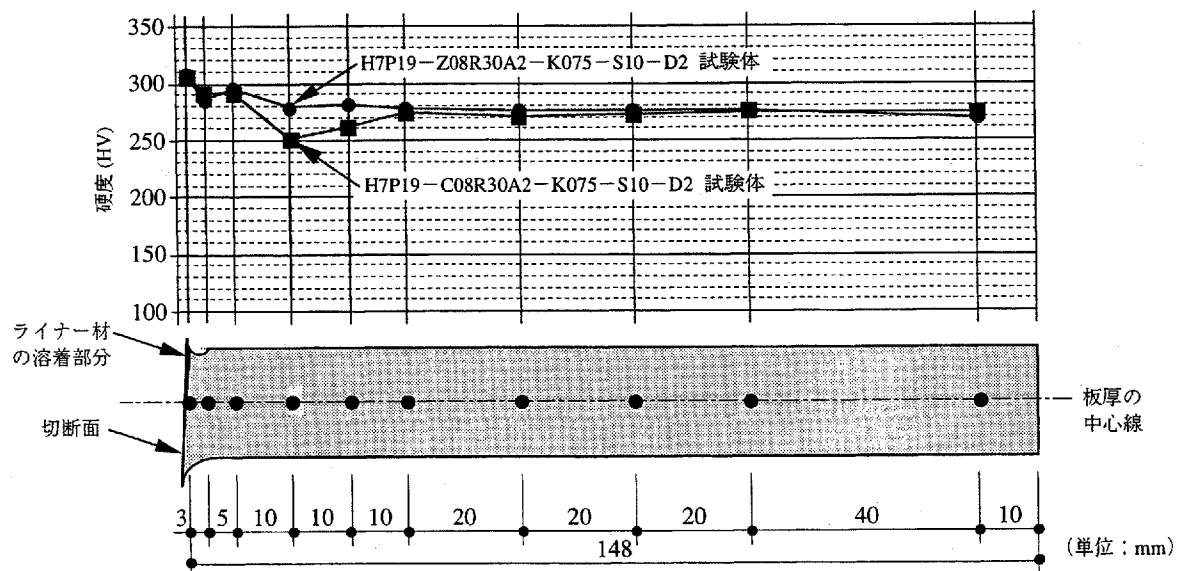


(b) 鋼板(19mm)を完全に切断した場合

図3-4-13 ライナー材の材質の違いによる硬度分布 (SA440B 鋼材の場合)

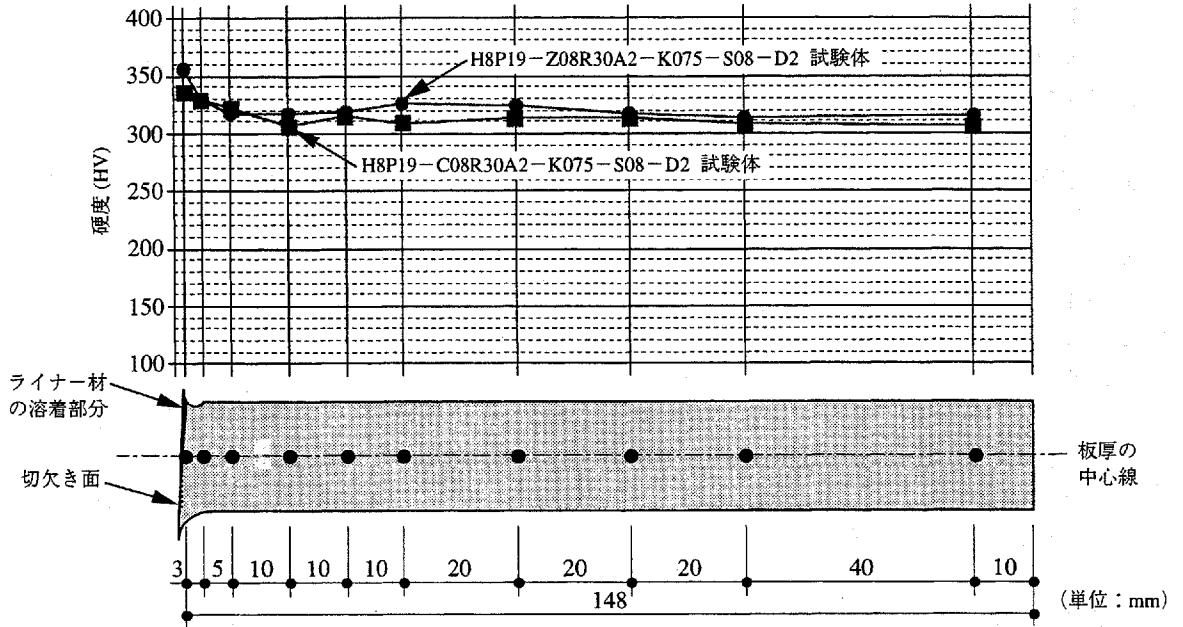


(a) 鋼板板厚の約2/3(12mm)まで切欠いた場合

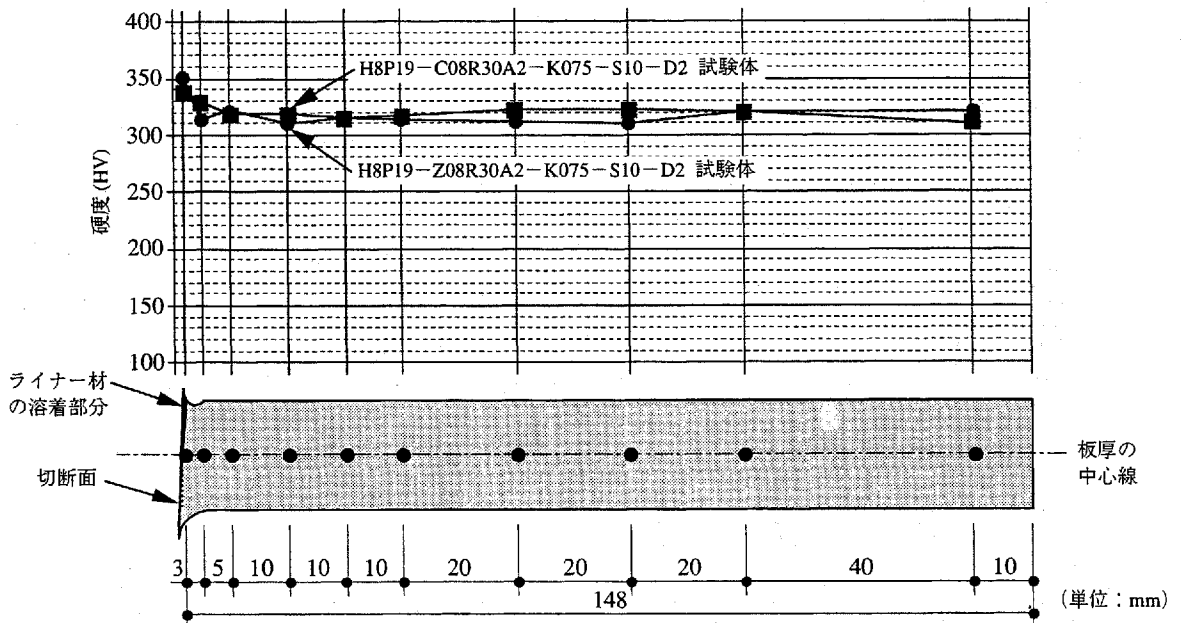


(b) 鋼板(19mm)を完全に切断した場合

図3-4-14 ライナー材の材質の違いによる硬度分布 (HITEN690B 鋼材の場合)



(a) 鋼板板厚の約2/3(12mm)まで切欠いた場合



(b) 鋼板(19mm)を完全に切断した場合

図3-4-15 ライナー材の材質の違いによる硬度分布 (HITEN780B 鋼材の場合)

## 3.4.6 鋼板の材料強度の違いによる変形量

表3-4-1, 2に示す切欠きNo.3試験体(完全切断のS10シリーズを除く)における起爆前後の鋼板の変形量を表3-4-3に示す。同表中の※印は鋼板の変形を目視で確認できず、計測器でも計測不能であったことを示している。なお、各計測点の位置関係は図3-4-16に示す通りである。

図3-4-17(a), (b)は、表3-4-3内の鋼板の切欠き深さを約2/3(12mm)に想定したS08シリーズにおける鋼板中央部をたわみ値を比較したものである。なお、(a)は起点での鋼板中央部のたわみを、(b)は終点での鋼板中央部のたわみを示している。また、●印はライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を、■印はライナー材に銅板を用いた場合を表わしている。

同図から、起点、終点に関係なく鋼板の材料強度が高くなるにつれたわみ値は低くなっており、変形しづらいことが確認できる。また、同一強度の鋼板におけるライナー材の材質の違いのみ(同一形状の成形爆薬)で比較すると、SS400鋼材では溶融亜鉛めっき鋼板よりも銅板を用いた場合のたわみ値が小さくなる傾向にあるものの、その他の鋼材では逆に銅板を用いた場合のたわみ値が大きくなる傾向にあることが確認できる。

鋼板の切欠き深さを約1/3(6mm)に想定したS06シリーズおよび切欠き深さを約2/3(12mm)に想定したS08シリーズにおける起爆前後の鋼板長さの変化を比較したものを図3-4-18(a), (b)に示す。

同図から、起点、終点に関係なく切欠き深さの浅いS06シリーズにおいては、ほとんど変化しないことが確認できる。一方、切欠き深さの深いS08シリーズにおいては、鋼板の材料強度が高くなるにつれ鋼板長さ比は著しく変化し、高くなる傾向にあることが確認できる。

これらの結果から、衝撃荷重下における鋼板の変形量は、切欠き深さが深くなるほど材料強度の影響を受け易くなると考えられる。

表3-4-3 切欠き試験体における起爆前後の変形量

試験体名	起 点				終 点			
	LP1 (mm)	LP2 (mm)	LP2/LP1	$\delta P$ (mm)	LP1 (mm)	LP2 (mm)	LP2/LP1	$\delta P$ (mm)
SP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3	300.29	299.86	0.999	3.52	300.93	300.30	0.998	3.75
SP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	300.24	292.87	0.975	22.34	300.02	292.65	0.975	22.61
SP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3	300.26	299.52	0.998	5.28	300.34	299.44	0.997	5.68
SP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	300.32	295.18	0.983	19.01	300.14	294.70	0.982	19.26
MP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3	300.35	299.80	0.998	2.25	300.30	299.96	0.999	2.51
MP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	299.94	296.14	0.987	14.81	300.16	296.38	0.987	14.95
MP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3	300.37	299.82	0.998	3.18	300.23	299.37	0.997	3.68
MP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	299.87	295.31	0.985	17.32	300.05	295.17	0.984	17.21
AP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3	299.91	299.96	1.000	※	300.03	300.09	1.000	※
AP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	300.41	298.63	0.994	8.15	300.03	298.56	0.995	8.63
AP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3	300.07	300.09	1.000	※	300.17	300.21	1.000	※
AP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	300.58	297.68	0.990	12.80	300.31	297.18	0.990	12.78
H7P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3	300.16	300.18	1.000	※	300.34	300.41	1.000	※
H7P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	300.23	298.91	0.996	7.04	300.04	298.57	0.995	7.34
H7P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3	300.41	300.50	1.000	※	300.25	300.28	1.000	※
H7P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	300.68	297.12	0.988	14.43	300.52	297.00	0.988	14.55
H8P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.3	300.54	300.62	1.000	※	300.53	300.64	1.000	※
H8P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	300.25	299.51	0.998	5.32	300.17	299.40	0.997	5.39
H8P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.3	300.40	300.39	1.000	※	300.53	300.62	1.000	※
H8P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	300.55	298.97	0.995	8.58	300.48	298.89	0.995	8.53

LP1: 起爆前の鋼板長さ [実測値]、LP2: 起爆後の鋼板長さ [実測値]、 $\delta P$ : 起爆後の鋼板中央部のたわみ [実測値]、  
※: 計測不能



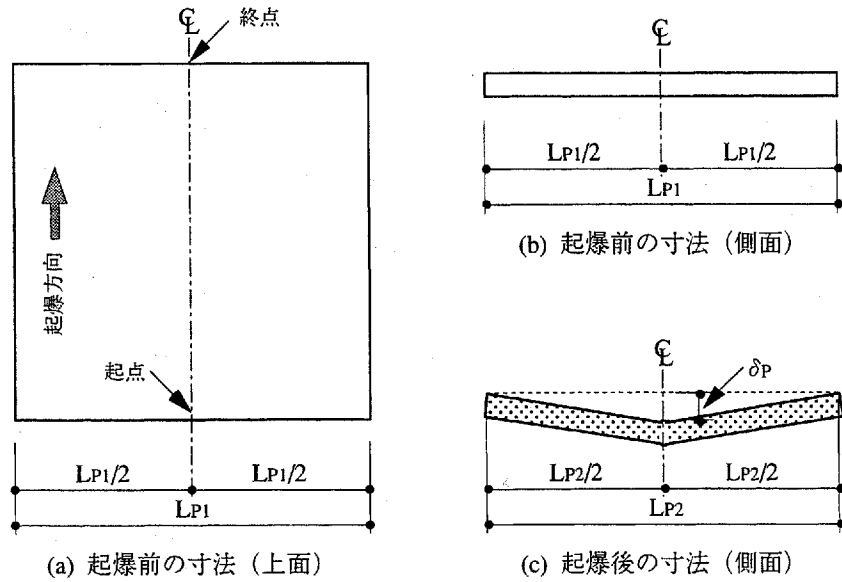
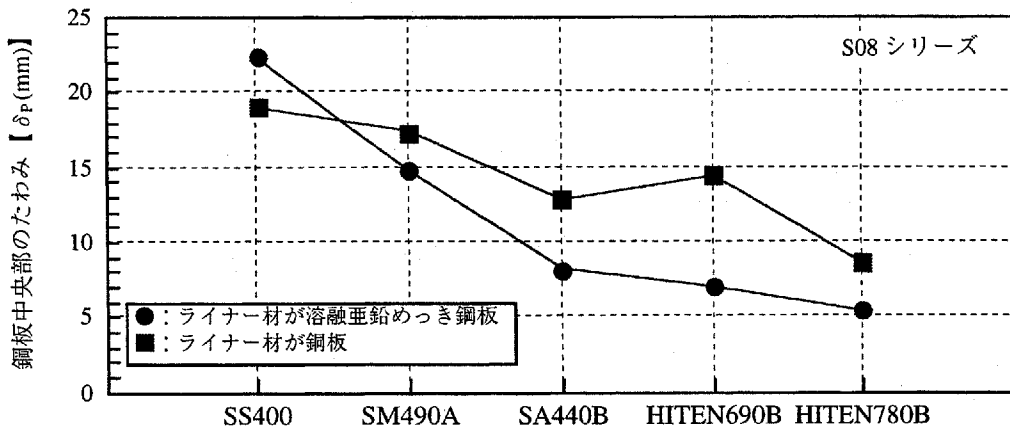
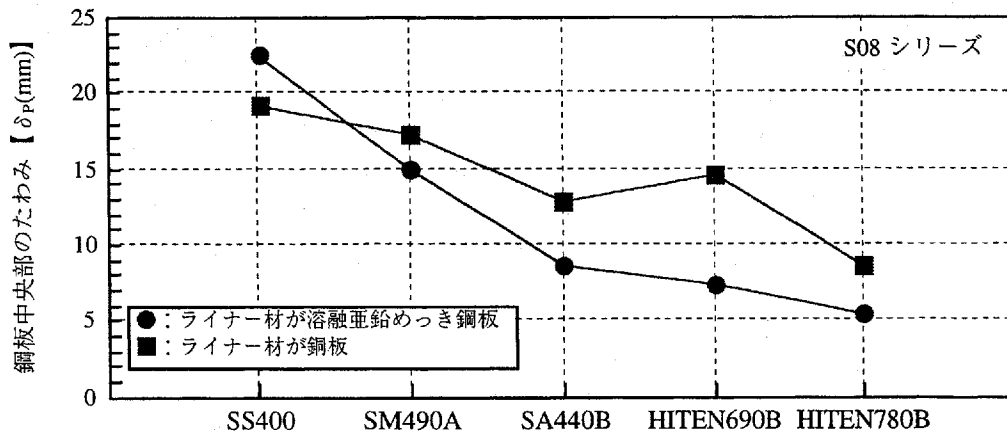


図3-4-16 起爆前後の鋼板の計測位置関係

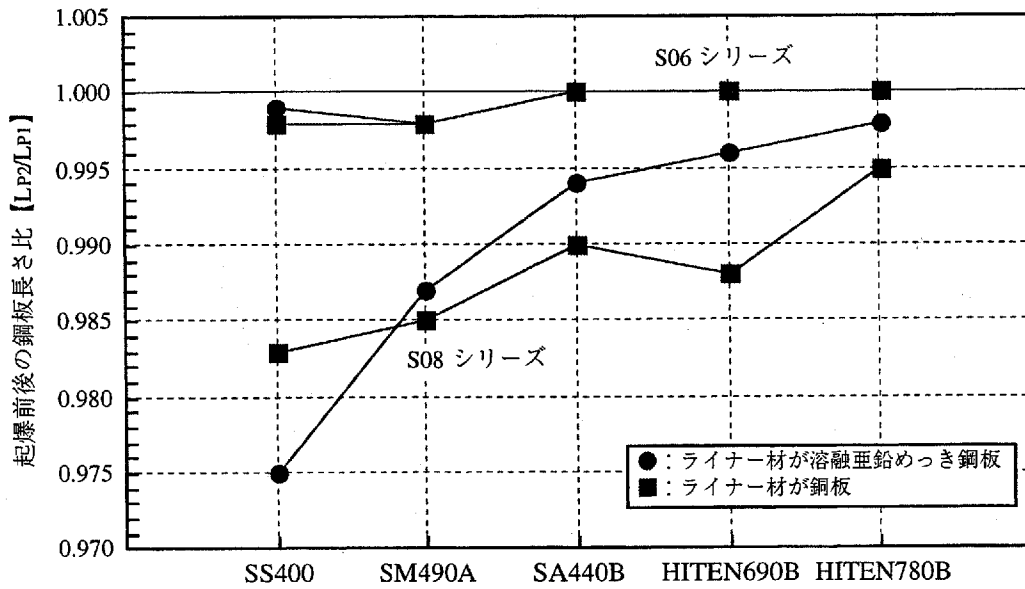


(a) 鋼板板厚の約 2/3(12mm) まで切欠いた場合の起点位置

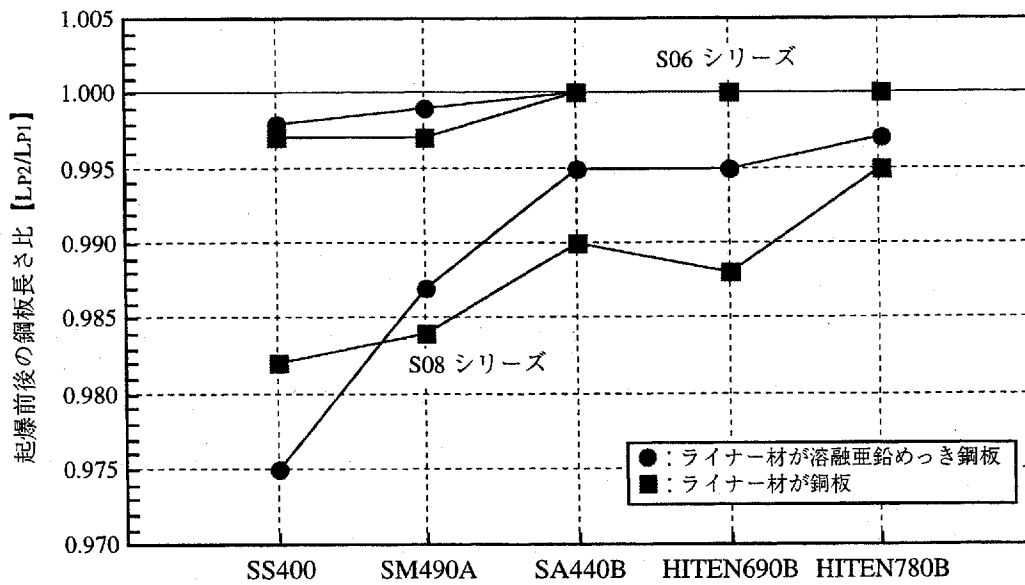


(b) 鋼板板厚の約 2/3(12mm) まで切欠いた場合の終点位置

図3-4-17 鋼板の材料強度の違いによる起爆後の鋼板中央部のたわみ



(a) 鋼板の起点位置



(b) 鋼板の終点位置

図3-4-18 鋼板の材料強度の違いによる起爆前後の鋼板長さ比

### 3.5 鋼板の材料強度を考慮した発破式

#### 3.5.1 発破係数の選定

実際の鋼構造建物を発破解体する場合は、対象となる建物の周辺に点在する近隣建物に対し、発破による騒音、振動を低減させるとともに、飛散物による発破災害を無くすことが不可欠である。これらの現象は爆薬の薬量に左右されることから、必要最小限の薬量を求める発破式が必要となる。

鋼板を切断する成形爆薬の薬量を求める現状の発破式は、式(3.2.2)に示すように鋼板の材料強度には関係なく、切断する断面積に比例する形になっている。しかしながら、3.4節の実験結果からも判断できるように、成形爆薬を用いた鋼板の切断能力には鋼板の材料強度が関係していることを確認している。また、文献1)に示されている発破係数はTNTを用いた場合の値であり、ペントライトを用いる場合の発破係数の具体的な数値は記載されておらず実績値から判断しなければならない。

そこで本節では、これらの実験結果から鋼板の材料強度を考慮した発破式を提案するために、鋼板板厚の約1/3(6mm)および約2/3(12mm)まで切欠いた切欠き試験体の2種類を用いて発破係数を求めた。なお、同一パラメータ内のNo.1～3試験体から発破係数の平均値および3体中の最大値および最小値を求め、同一パラメータの共通試験体の結果としてまとめた。

これらの結果は各鋼種の引張強度とともに表3-5-1に示す。同表中、SS400鋼材～SM490A鋼材における引張強度の公称値( $F_{sp}$ )はJIS規格の値とし、SA440B鋼材～HITEN780B鋼材の公称値( $F_{sp}$ )はJIS認定外であるため高炉メーカーの社内規格値とした。

表3-5-1 切欠き試験体の発破係数表

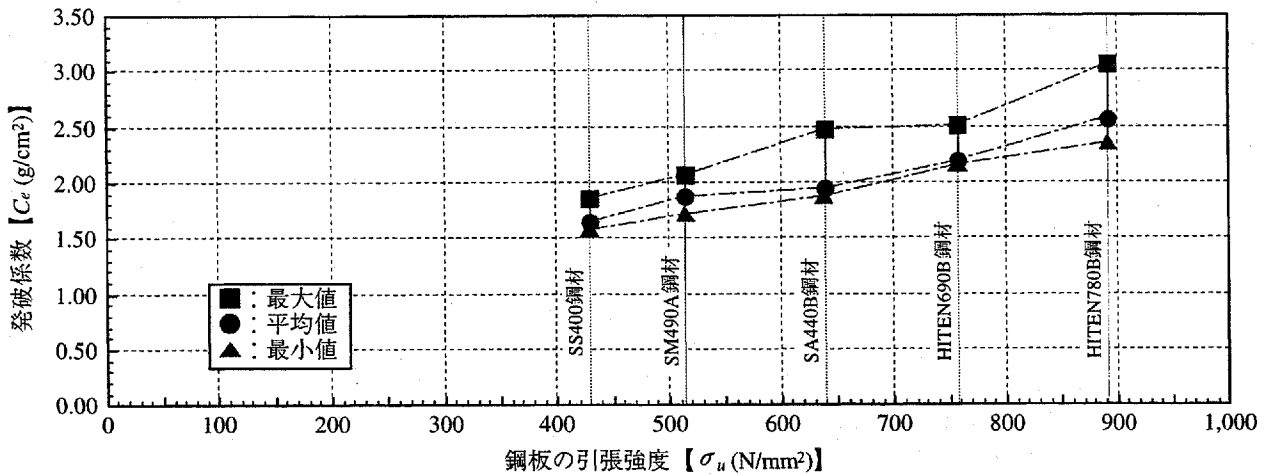
試験体名	引張強度			発破係数 (g/cm <sup>2</sup> )		
	$\sigma_u$ (t/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{sp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$minCe$ 【最小値】	$aveCe$ 【平均値】	$maxCe$ 【最大値】
SP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1～3	4.38	429.2	※1 400～510	1.579	1.643	1.852
SP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1～3				1.480	1.649	1.699
SP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1～3				1.504	1.765	1.804
SP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1～3				1.404	1.514	1.557
MP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1～3	5.25	514.5	※1 490～610	1.720	1.876	2.070
MP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1～3				1.600	1.709	1.847
MP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1～3				1.651	1.796	1.866
MP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1～3				1.491	1.622	1.666
AP19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1～3	6.52	639.0	※2 590～740	1.880	1.947	2.474
AP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1～3				1.785	1.842	2.049
AP19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1～3				1.788	1.855	2.131
AP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1～3				1.626	1.770	1.983
H7P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1～3	7.73	757.5	※2 690～830	2.159	2.193	2.507
H7P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1～3				1.929	2.032	2.358
H7P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1～3				1.877	1.983	2.325
H7P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1～3				1.720	2.064	2.235
H8P19-Z08R30A2-K075-S06-D2 No.1～3	9.10	891.8	※2 780～930	2.353	2.575	3.066
H8P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.1～3				2.019	2.081	2.430
H8P19-C08R30A2-K075-S06-D2 No.1～3				2.115	2.122	2.951
H8P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.1～3				1.880	2.007	2.330

$\sigma_u$  : 引張強度 [実測値]、 $F_{sp}$  : 引張強度 [公称値]、※1 : JIS規格、※2 : 高炉メーカーの社内規格、 $minCe$  : 発破係数の最小値 [実験値]、 $aveCe$  : 発破係数の平均値 [実験値]、 $maxCe$  : 発破係数の最大値 [実験値]

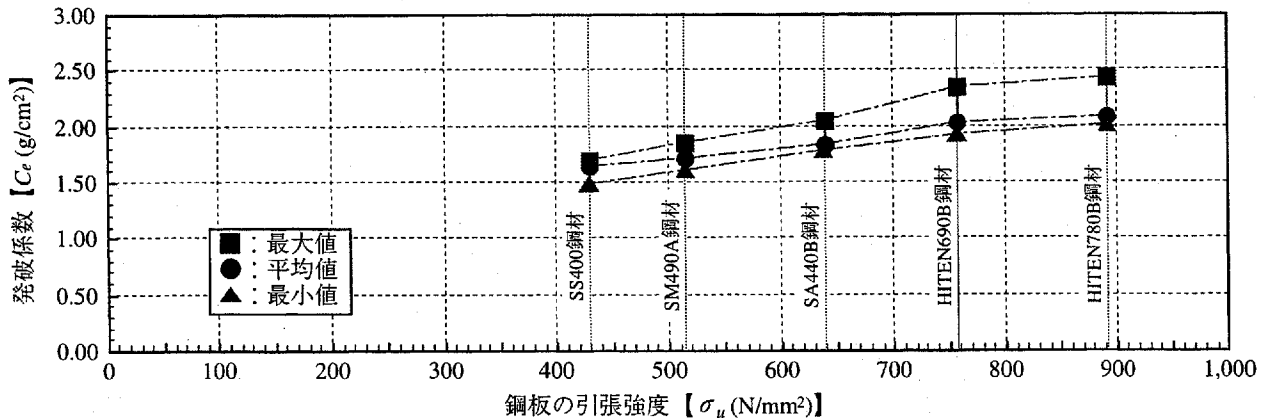
### 3.5.2 ライナー材の材質の違いによる発破係数の比較

鋼板の引張強度の違いによる発破係数の変化を切欠き深さおよびライナー材の材質の違い別に比較したものを図3-5-1(a), (b)および図3-5-2(a), (b)に示す。同図中、(a)は鋼板板厚の約1/3(6mm)まで切欠いた場合の発破係数の変化を、(b)は鋼板板厚の約2/3(12mm)まで切欠いた場合の発破係数の変化を示している。なお、■印は発破係数の最大値を、●印は発破係数の平均値を、▲印は発破係数の最小値を示している。

同図から、ライナー材の材質に関係なく、切欠き深さの浅いS06シリーズは切欠き深さの深いS08シリーズに比べて発破係数が大きく、鋼板の引張強度が高くなるにつれ発破係数の最大値と最小値の差が広がる傾向にある。一方、S08シリーズは鋼板の引張強度が高くなるにつれ発破係数の最大値と最小値の差が若干広がるものの、ほぼ直線的に変化する傾向にある。

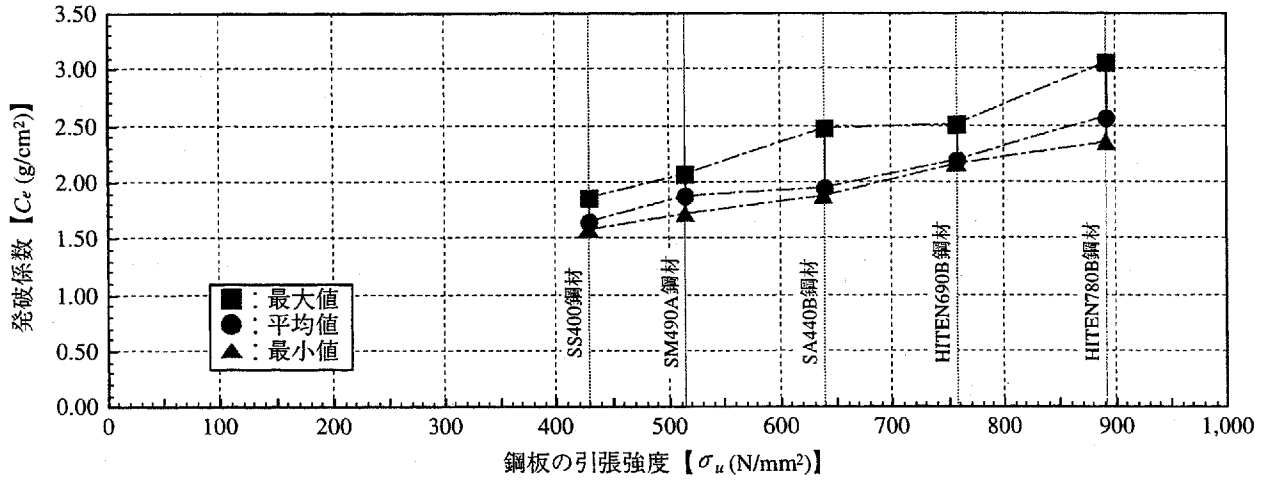


(a) 鋼板板厚の約1/3(6mm)まで切欠いた場合 (S06シリーズ)

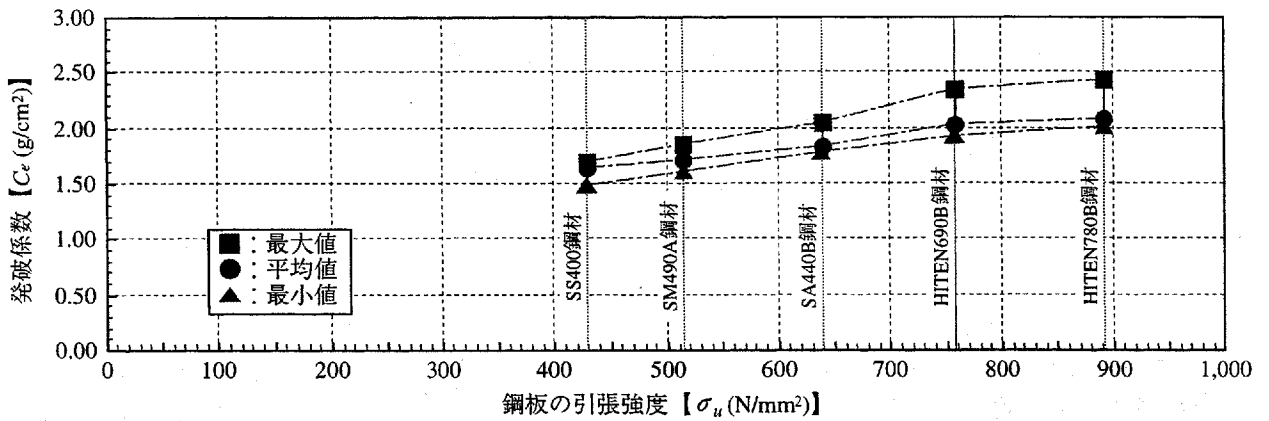


(b) 鋼板板厚の約2/3(12mm)まで切欠いた場合 (S08シリーズ)

図3-5-1 鋼板の引張強度の違いによる発破係数 (ライナー材が溶融亜鉛めっき鋼板の場合)



(a) 鋼板板厚の約1/3(6mm)まで切欠いた場合 (S06 シリーズ)



(b) 鋼板板厚の約2/3(12mm)まで切欠いた場合 (S08 シリーズ)

図3-5-2 鋼板の引張強度の違いによる発破係数 (ライナー材が鋼板の場合)

### 3.5.3 実験結果に基づく発破式

成形爆薬を用いて鋼構造建物を発破解体する場合は、主架構を構成する柱および梁部材の一部または全断面を完全に切断しなければならない。しかし、本研究で鋼板を完全切断した実験データは完全に切断することが可能であるという実績のみで、必要最小限の薬量を把握できるものではない。

そこで、鋼板の材料強度を考慮した発破式を導くためには、鋼板の途中まで切欠いた試験体の実験結果から完全切断に必要な発破係数のデータを用いるのが有効であると考え、鋼板の完全切断に最も近い板厚の約2/3まで切欠いたS08シリーズの発破係数について検討することにした。なお、図3-5-1, 2に示す発破係数の比較において、鋼板の切欠き深さが深くなるにつれ発破係数も低くなる傾向にあることから、本節で得られる発破式は安全側に評価できると思われる。

ライナー材の材質別に発破係数と鋼板の引張強度との関係を数式化する試みとして、S08シリーズの各鋼種毎に正規分布に近似した標準偏差を求め、99.999%以上を占める標準偏差の5倍を用いて回帰直線で表すことにした。この結果を図3-5-3(a), (b)に示す。同図中、(a)はライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用いた場合の発破係数を、(b)は鋼板を用いた場合の発破係数を示している。また、同図には、爆薬にTNTを用いた場合の発破係数<sup>1)</sup>と、国内で実施された鋼構造建物(全てSS400鋼材)の発破係数<sup>5), 6)</sup>も載せている。

同図(a)から、ライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用いる場合の発破係数と鋼板の引張強度との関係式は次式のようにになる。

$$C_e = 0.0019 \sigma_u + 0.99 \quad \dots \dots \dots (3.5.1)$$

ここで、 $C_e$ ：発破係数( $\text{g}/\text{cm}^2$ )、 $\sigma_u$ ：鋼板の引張強度( $\text{N}/\text{mm}^2$ )を表す。

この式(3-5-1)は各鋼板の引張強度に対する実験結果を十分評価しており、爆薬にTNTを用いた場合の発破係数に比べてはるかに低い値を示していることが確認できる。

一方、同図(b)から、ライナー材に鋼板を用いる場合の発破係数と鋼板の引張強度との関係式は次式のようにになる。

$$C_e = 0.0023 \sigma_u + 0.75 \quad \dots \dots \dots (3.5.2)$$

なお、 $C_e$ および $\sigma_u$ は式(3.5.1)と同様である。

この式(3-5-2)は各鋼板の引張強度に対する実験結果を十分評価しており、爆薬にTNTを用いた場合の発破係数に比べてはるかに低い値を示していることが確認できる。また、国内で実施された鋼構造建物の発破係数と比較するために、式(3-5-2)の引張強度としてSS400鋼材の公称値( $F_{sp}$ )の上限値 $510\text{N}/\text{mm}^2$ を代入した値を同図中に○印で示している。この値は実験結果を安全側に評価していることから、国内で実施された鋼構造建物の発破解体<sup>5), 6)</sup>に用いた成形爆薬の薬量は必要以上に使用されたことを示している。

これらの結果から、鋼構造建物の発破解体に用いる成形爆薬にペントライトを用いた場合の薬量を求める発破式は以下のように表すことができる。

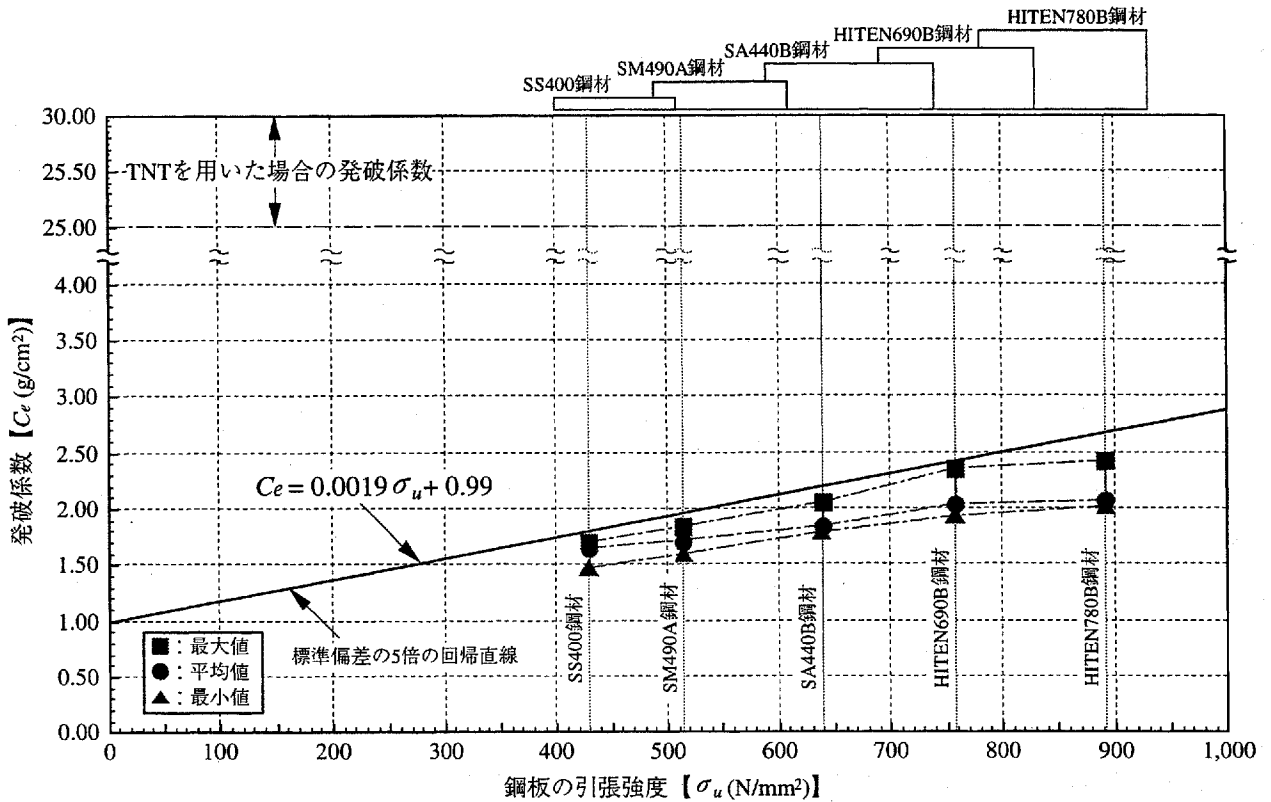
【ライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用いる場合】

$$\begin{aligned} W_{sc} &= C_e \cdot A(t) \\ &= (0.0019 \sigma_u + 0.99) \cdot A(t) \quad \dots \dots \dots (3.5.3) \end{aligned}$$

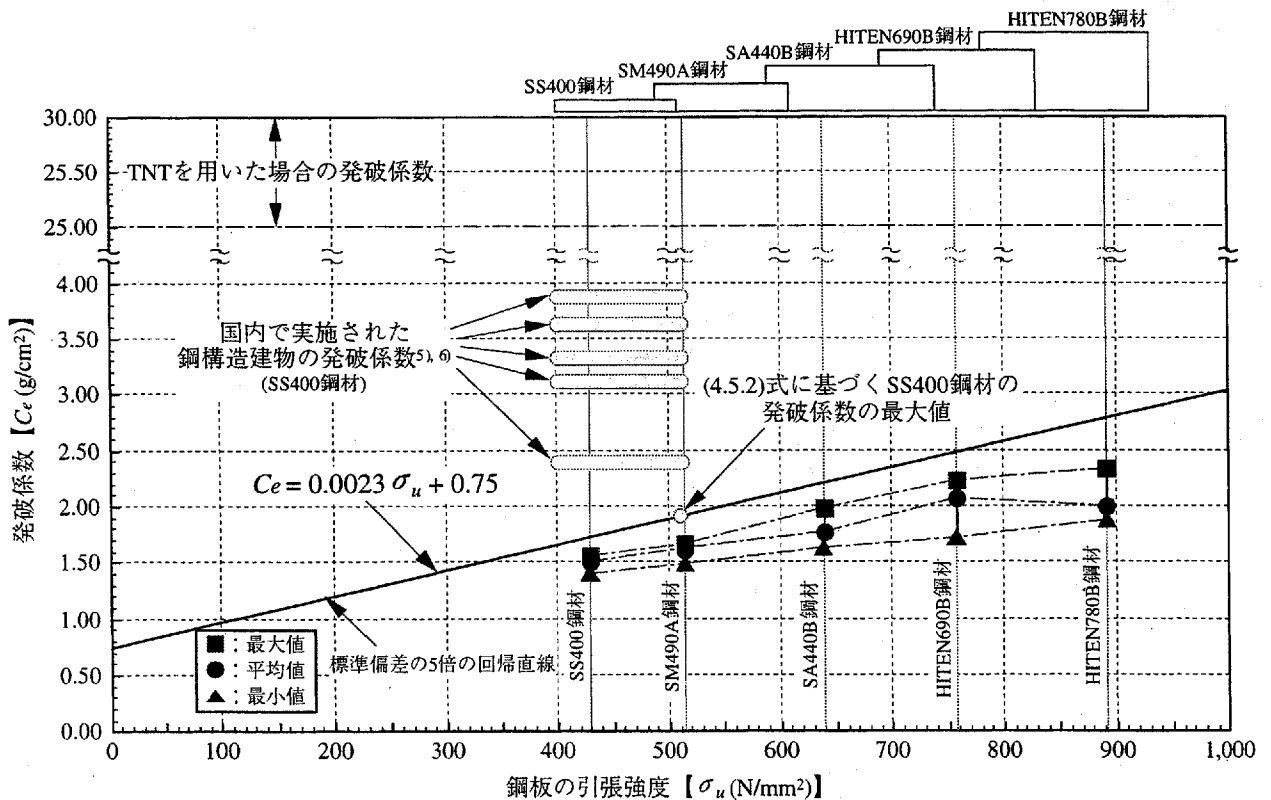
【ライナー材に鋼板を用いる場合】

$$\begin{aligned} W_{sc} &= C_e \cdot A(t) \\ &= (0.0023 \sigma_u + 0.75) \cdot A(t) \quad \dots \dots \dots (3.5.4) \end{aligned}$$

ここで、 $W_{sc}$ ：薬量( $\text{g}$ )、 $C_e$ ：発破係数( $\text{g}/\text{cm}^2$ )、 $A(t)$ ：板厚( $t$ )mmの鋼板の切断面積( $\text{cm}^2$ )を表し、 $\sigma_u$ ：鋼板の引張強度( $\text{N}/\text{mm}^2$ )を表している。なお、実施で式(3.5.3)または式(3.5.4)を用いる際、主架構の引張強度を事前に調査した場合はその強度を代入し、調査できない場合は各鋼種に対する公称値の上限値を引張強度として代入する。



(a) ライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用いた場合



(b) ライナー材に銅板を用いた場合

図3-5-3 発破係数と鋼板の引張強度との関係 (S08 シリーズ)

### 3.6 まとめ

本章では、爆薬にペントライトを用いた成形爆薬による鋼板の切欠き深さを制御するため、爆薬ケースに熔融充填する薬量を変化させ、鋼板の材料強度およびライナー材の材質をパラメータとした鋼板の切欠き実験を行うとともに、その結果を用いた鋼板の材料強度を考慮した発破式を提示した。ここで得られた結果を要約すると、以下のようになる。

- ①SS400鋼材においては設定した薬量で切欠き深さを制御できるものの、鋼板の材料強度が強くなるにつれ切欠き深さは想定値を下回る傾向にあることから、成形爆薬による鋼板の切断過程において鋼板の材料強度の影響を受けていると考えられる。
- ②ライナーカッターが鋼板に進行する起点と終点近傍では、全試験体において切欠き深さが大きくなる傾向が見られるものの、ライナー材の材質、鋼板の材料強度に関係なく、切欠き深さの分布はほぼ直線状となることが確認できた。
- ③成形爆薬により衝撃力を受けた鋼板の硬度変化は、ライナー材の材質、鋼板の材料強度、鋼板の切欠き深さに関係なく、切欠き面または切断面近傍が最も高くなる傾向にある。また、鋼板の材料強度が高くなるにつれ、切欠き面または切断面近傍以外の硬度変化は緩やかであり、ほぼ一定となる傾向にある。
- ④本章で提示した鋼板の材料強度を考慮した発破式は、実験結果を十分評価しており、国内で実施された鋼構造建物の発破解体における実績値よりも薬量を少なくすることが可能であると考えられる。なお、発破式に代入する引張強度は、主架構の部材を事前に調査した場合にはその引張強度を用い、調査できない場合には各鋼種に対する公称値の上限値を用いる。

### 【参考文献】

- 1) 中原正二：火薬学概論、産業図書、昭和62年4月
- 2) (社)火薬学会編：火薬ハンドブック、共立出版、1994.3
- 3) 加藤政利，中村雄治，松尾 彰，緒方雄二，勝山邦久，橋爪 清：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、火薬学会誌、Vol.59, No.5, pp.261～274、1998.10
- 4) 加藤政利，中村雄治，松尾 彰，玉井宏章，橋爪 清：鋼構造物の制御発破解体時における鋼材の衝撃破壊現象に関する研究、鋼構造年次論文報告集、Vol.6, pp.17～24、1998.11
- 5) 小林茂雄，木下雅敬，中津賢一，中川浩二：鉄骨構造物の発破解体工法における設計・施工、構造工学論文集、Vol.38A, pp.1213～1225、1992.3
- 6) 小林茂雄：構造物の発破解体に関する研究、山口大学学位論文、1994
- 7) 緒方雄二，和田有司，勝山邦久，西田 佑，星野雅一，長野正幸：鉄骨構造物の爆破解体に関する研究（第1報 鉄柱部材の挙動について）、火薬学会誌、Vol.58, No.3, pp.116～122、1997
- 8) 星野雅一，長野正幸，西田 佑，緒方雄二，和田有司，勝山邦久：鉄骨構造物の爆破解体に関する研究（第2報 高炉槽発破解体工事）、火薬学会誌、Vol.58, No.3, pp.123～130、1997
- 9) 松原重一：爆薬による鋼材切断の研究、東京大学学位論文、1978
- 10) 佐藤忠五郎，福山郁生，若園吉一：爆破 [全訂2版]、鹿島出版会、昭和62年3月
- 11) 日本火薬工業会資料編集部：一般火薬学、平成3年4月



## 第4章 成形爆薬による鋼板の衝撃破壊メカニズム

### 4.1 まえがき

成形爆薬の爆発現象が鋼板に与える衝撃破壊現象の大部分は、モンロー効果（ノイマン効果）のように仮説や理論上の仮定で説明されているものの、切断メカニズムに関する実験的な研究<sup>5)</sup>が少ないことから明確にされていない。また、第3章の実験結果から、成形爆薬による鋼板の切断過程における最終段階では、モンロー効果のジェットによる切断とは異なり、固体の金属片すなわちライナーカッターが大きく寄与している痕跡が見受けられた。

そこで本章では、成形爆薬による鋼板の衝撃破壊メカニズムを実験的に見直す試みとして、高速度カメラを用いて爆速と爆薬の挙動を記録し、鋼板の切断・破壊メカニズムについて考察を行う。また、実験終了後の鋼板を用いて冶金分析を行い、成形爆薬の爆轟に伴う外力（衝撃力）に対する鋼板の抵抗痕跡や化学成分の変化等を検証することにより、鋼板の衝撃破壊メカニズムに関する一考察を行う。

### 4.2 高速度カメラによる鋼板の破壊挙動の解明に関する実験計画

#### 4.2.1 使用鋼板およびライナー材について

本実験の試験体は、中低層建物のH形鋼柱を想定し、広幅・中幅系の熱間圧延H形鋼の内、実績の多いフランジ幅、フランジ板厚を考慮することとし、第3章の実験結果から、完全に切断できる鋼板を使用することを前提とした。

その結果、板厚19mmで300mm×300mmの正方形鋼板とし、SS400鋼材を用意した。また、成形爆薬に使用するライナー材の材質は、第3章と同様に溶融亜鉛めっき鋼板(SGCC)および銅板(C1201P-1/4H)の2種類で、共に板厚0.8mmの薄板を用いることとした。

本実験で用いた各鋼板およびライナー材の機械的性質および化学成分を表4-2-1、4-2-2に示す。

表4-2-1 鋼材およびライナー材の機械的性質

種類	板厚 (mm)	$\sigma_y$		$\sigma_u$		YR (%)	EL (%)	HRB
		(t/cm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(t/cm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )			
鋼板 (SS400)	19	2.67	262	4.38	429	61.0	33	94
溶融亜鉛めっき鋼板 (SGCC)	0.8	2.61 <sup>*1</sup>	256 <sup>*1</sup>	3.66	359	71.3	36	77
銅板 (C1201P-1/4H)	0.8	1.76 <sup>*1</sup>	172 <sup>*1</sup>	2.44	239	72.4	38	54

$\sigma_y$ : 降伏応力,  $\sigma_u$ : 引張強度, YR: 降伏比, EL: 伸び,  
HRB: ロックウェル硬さ(Bスケール), \*1: 0.2%オフセット法による

表4-2-2 鋼材およびライナー材の化学成分

種類	C	Si	Mn	P	S	Cu	Zn目付量 (両面) (g/m <sup>2</sup> )
	×100 (%)			×1000 (%)		(%)	
SS400 <sup>*2</sup>	15	19	68	10	3	—	—
SGCC <sup>*3</sup>	2	2	24	19	14	—	244
C1201P-1/4H <sup>*3</sup>	—	—	—	20	—	99.98	—

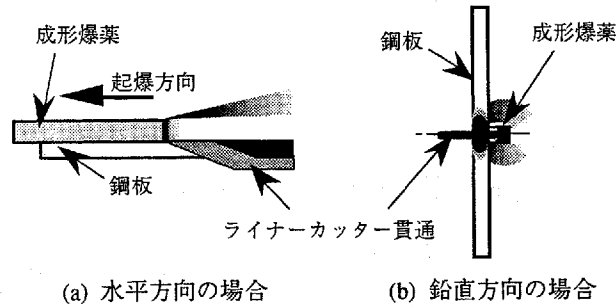
\*2: ミルシート値, \*3: 化学成分の分析値

### 4.2.2 実験パラメータおよび成形爆薬の形状と試験体の設置方向

本実験の実験パラメータは、ライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板と銅板の2種類を用いた材質の違いによる破壊性状を把握することとした。これら各ライナー材の機械的特性および化学成分は表4-2-1および表4-2-2に示してある。また、成形爆薬および鋼板の設置方向として梁部材を対象とした水平方向および柱部材を対象とした鉛直方向の2方向に対し爆発現象を撮影(図4-2-1参照)し、重力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識別や分析できるように、爆薬ケースには無色透明の亚克力樹脂板を用いることにした。

本実験で用いた成形爆薬の形状(図2-6-1参照)は、第3章で実施した実験結果を参考に、最も切断効果の大きかった形状係数を $\kappa=0.75$ ( $\kappa=H/W$ ,  $W=20\text{mm}$ ,  $H=15\text{mm}$ )に、ライナー角を $\alpha=90^\circ$ に限定した。また、爆薬にはペントライトを使用し、精密電気雷管(日本化薬(株)製品)により起爆した。なお、爆薬の設置方法は、図4-2-1(a)の場合には鋼板上面に直置きとし、同図(b)の場合にはテープで簡単に止める程度とした。

上述の各実験パラメータの組合せを表4-2-3に示す。なお、各試験体の名称は図3-3-1(pp.18)と同じである。



(a) 水平方向の場合 (b) 鉛直方向の場合

図4-2-1 試験体の設置方向および撮影方向

表4-2-3 実験パラメータの組合せ

試験体名称	爆薬ケース	鋼板	ライナー材	$\alpha$	$S_t$ (mm)	W (mm)	H (mm)	$\kappa$	L (mm)	試験体の 設置方向								
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.1	亚克力樹脂 (無色透明) 板厚: 3.0mm	SS400 $t=19.0\text{mm}$	溶融亜鉛 めっき鋼板 $T=0.8\text{mm}$	90°	10	20	15	0.75	370	水平方向								
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.2											鉛直方向							
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3												銅板 $T=0.8\text{mm}$						
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.4													水平方向					
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.5														鉛直方向				
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.1			銅板 $T=0.8\text{mm}$							90°	10	20	15		0.75	370		
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.2																	水平方向	
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3																		鉛直方向
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.4																		
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.5														鉛直方向				

$\alpha$ :ライナー角(頂角),  $S_t$ :スタンドオフ, W:爆薬幅, H:爆薬高さ,  $\kappa$ :形状係数, L:爆薬長さ

## 4.2.3 精密起爆器の概要

本実験で使用する精密起爆器(写真4-2-1参照)は、精密雷管を高精度に起爆させる装置である。この起爆器<sup>3)</sup>は、制御部、出力部、電源部からなり、出力部にはそれぞれ独立した5チャンネルの起爆回路がある。

出力部では、制御部からの制御信号で電流制御用のサイリスタが作動し、コンデンサーに充電してある大電流を一気に放出して電気雷管を起爆させる。制御部では、各々の回路を $1\mu\text{sec}$ から $10\text{sec}$ まで $1\mu\text{sec}$ の精度で任意に起爆開始信号を入力した時間から、実際に起爆されるまでの時間差を設定することができる。また、精密雷管の起爆方法には、押しスイッチによる起爆方法と外部パルス入力による起爆方法の2種類があるが、高速度カメラとの連動による破壊現象等の観測が主目的であるため、精密起爆器は外部パルス入力による起爆方法とした。なお、精密起爆器は日本化薬(株)製のものを使用しており、以下にこの精密起爆器の仕様を示す。

- |           |  |
|-----------|--|
| ①起爆回路数    | : 5チャンネル                               |
| ②制御時間     | : $1\mu\text{sec}$ から $10\text{sec}$   |
| ③制御精度     | : $1\mu\text{sec}$                     |
| ④充電電圧     | : 2,500V 以上                            |
| ⑤コンデンサー容量 | : $4\mu\text{F}$ /チャンネル                |
| ⑥出力部出力負荷  | : $1 \pm 0.5\Omega$                    |
| ⑦出力電流     | : 1kA 以上                               |
| ⑧負荷ケーブル   | : RG5A/U 10m                           |
| ⑨起爆方法     | : (a) 押しスイッチ<br>(b) パルス入力(高速度カメラからの信号) |

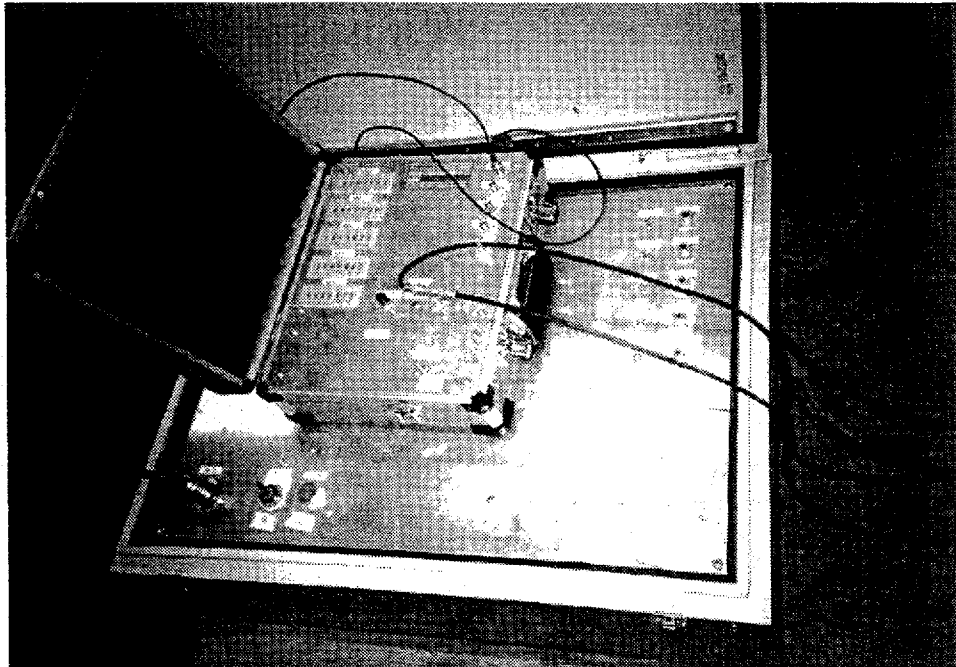


写真4-2-1 高速度カメラの精密起爆器

#### 4.2.4 高速度カメラの概要

本実験で使用した高速度カメラ(写真4-2-2参照)は、通商産業省工業技術院資源環境技術総合研究所内の爆発ドーム(茨城県つくば市)に設置されているCORDIN社製のフレミングカメラ124(フレーム速度:100,000~2,500,000FPS(Frame/sec)、撮影コマ数:26コマ、使用フィルム:カラー35mm)で、フラッシュにはクセノンフラッシュ(4kV以上)を使用した。

高速度カメラによる撮影では、撮影コマ数が限定されることから、撮影開始前に高速度カメラの制御装置<sup>3)</sup>(写真4-2-3参照)から発信される信号を精密起爆器の制御部にパルス入力し、精密雷管の起爆時間を設定した。

高速度カメラによる観測では、図4-2-1に示すように、観測する方向および箇所を事前に検討し、試験体の鋼板および成形爆薬をセットした後、高速度カメラのフレーム速度を500,000FPS(コマ間隔=2 $\mu$ sec)に設定して破壊現象を撮影した。なお、高速度カメラの系統を図4-2-2に示す。

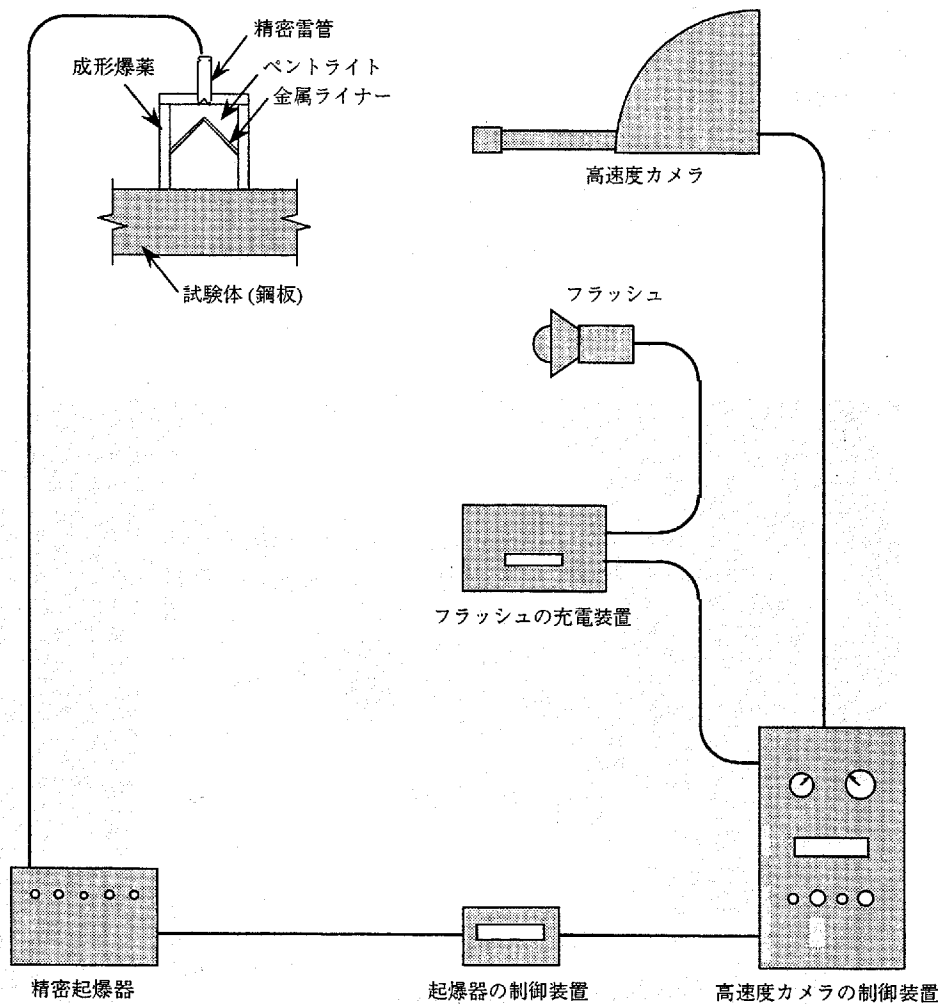


図4-2-2 衝撃破壊現象を撮影するための高速度カメラの系統図

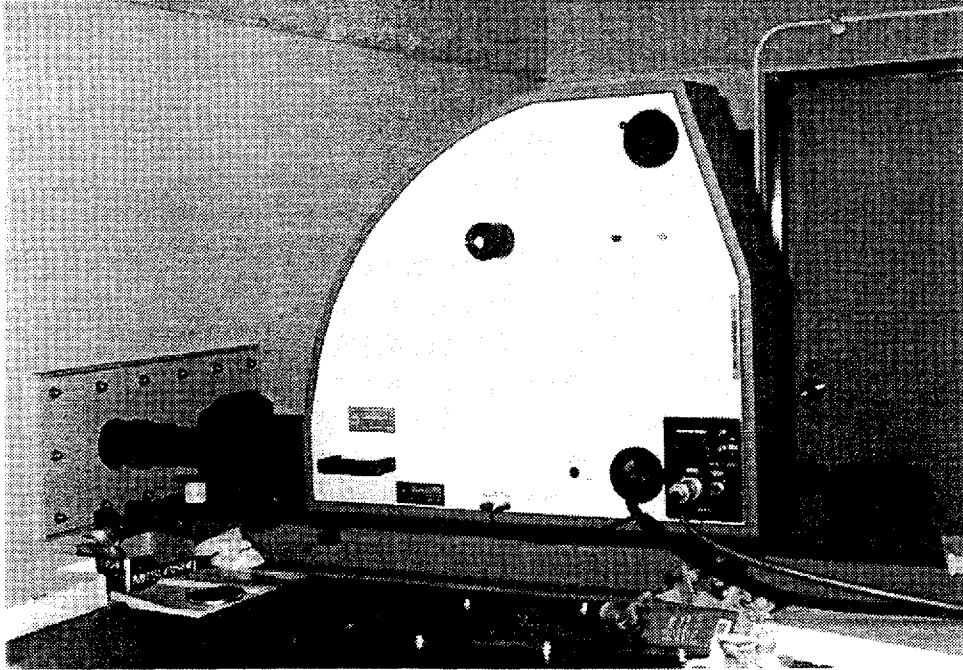


写真4-2-2 高速度カメラの全景

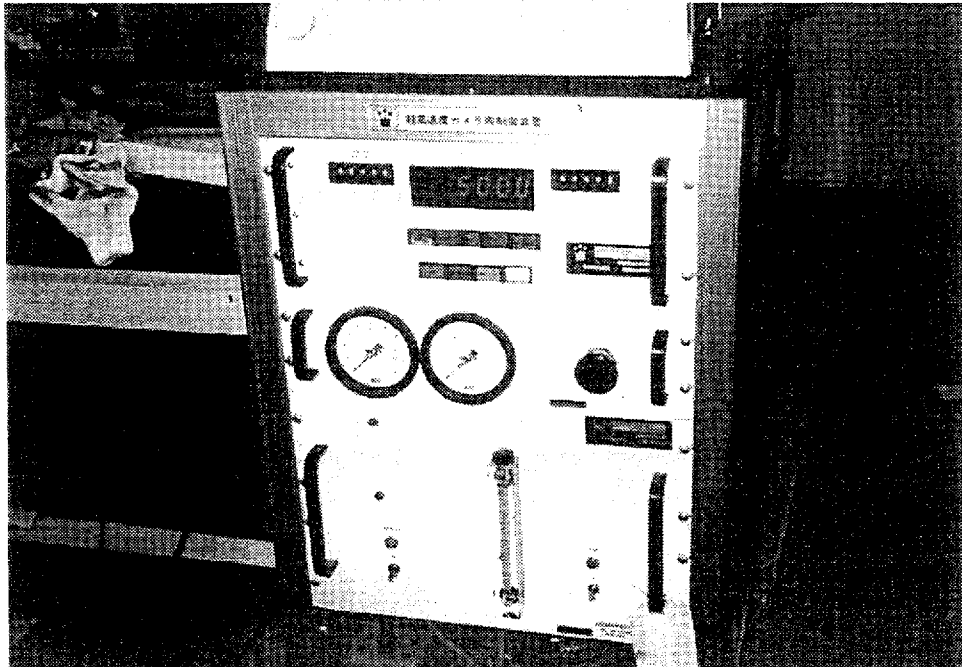


写真4-2-3 高速度カメラの制御装置

#### 4.2.5 爆轟速度の計測方法

本実験における爆轟速度の計測方法<sup>3)</sup>は、図4-2-3に示すように、爆薬ケースの上面に取り付けた抵抗線によって計測する抵抗線法を採用した。なお、抵抗線からデータを記録する方法は、定電流装置とデジタルオスロを使用してデジタル保存した。ここで定電流装置とは、抵抗線の定電流を供給する装置であり、デジタルオスロとは、電圧の変化を計測する装置である。

この抵抗線のデータを爆轟速度に変換する方法は、抵抗線に定電流を常流しておき、爆発時の電圧の変化を計測することにより抵抗線の抵抗値(長さ)の変化を求めるものである。この現象は、オームの法則( $E=IR$ )の内、 $I$ (電流)は一定なので $R$ (抵抗)が爆轟波の伝播により減少し、その結果 $E$ (電圧)も減少することを意味している。

解析方法は、この電圧のデータをコンピュータに取り込み、 $X=x_1$ の時 $Y=a_1X+b_1$ と仮定して $a_1$ を最小二乗法で求める方法である。ただし、 $x_1$ は任意の点である。ここで、 $Y=a_1X+b_1$ は $X=x_1$ における接線であり、 $X=x_1 \pm 10 \sim 100$ の精度で計算して爆轟速度を求めるものである。

この爆轟速度の計測方法は、火薬を扱う分野では一般に知られている方法である。ただし、ノイズが入りやすいため、信頼性のある正確なデータを得るためには同一パラメータの実験を数体行う必要があると思われる。

なお、高速度カメラによる写真からも爆轟速度が確認できるように、成形爆薬の側面に2mm間隔で目盛を取り付けてある。(写真4-2-4参照)

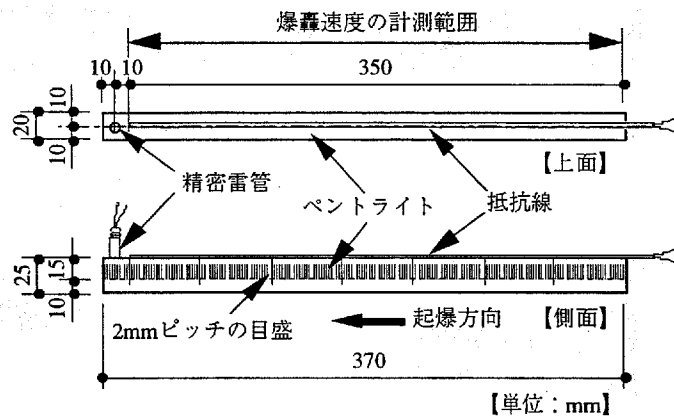


図4-2-3 爆轟速度の計測用抵抗線の設置概要

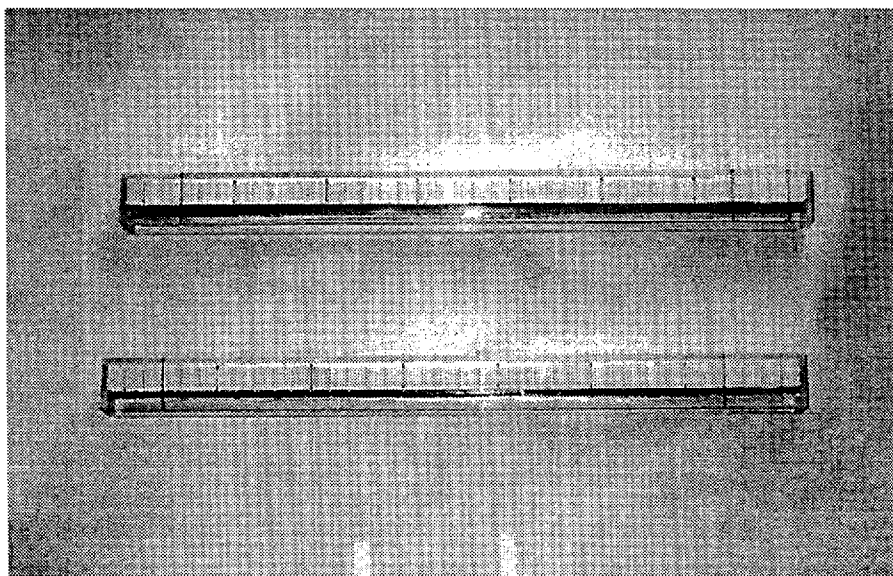


写真4-2-4 爆轟速度の計測用目盛(2mm 間隔)の設置状況

### 4.3 高速度カメラによる鋼板の破壊挙動の解明に関する実験結果と考察

#### 4.3.1 実験結果

本実験で用いた各成形爆薬の計測値および起爆終了後の主な破壊状況を表4-3-1に示す。同表中、\*印が付いた切断深さの値は、完全に切断されていることから、鋼板の最小板厚、最大板厚を表している。

本実験の試験体は4.2.2節で設定した通り、全て完全切断することができたことから、第3章の結果も含むいずれのライナー材の材質に対しても、成形爆薬の爆薬幅をW=20mm、爆薬高さをH=15mmとした形状係数が $\kappa=0.75$ の断面形状に設定すれば、板厚19mmのSS400鋼材を完全に切断することが可能であることが確認できた。また、図4-2-1(a), (b)に示した撮影状況の概要からも分かるように、重力の作用する方向に関係なく鋼板を完全に切断することができたことから、板厚19mm程度の鋼板であれば、切断効果は重力に余り関係しないと思われる。

表4-3-1 成形爆薬の計測値および破壊状況

試験体名称	W <sub>1</sub> (mm)	H <sub>1</sub> (mm)	$\kappa_1$	爆薬長 (mm)	爆薬量 (g)	充填密度 (g/cm <sup>3</sup> )	切断深さ [最小](mm)	切断深さ [最大](mm)	主な破壊状況
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.1	20.26	15.06	0.74	369.9	116.5	1.555	18.50 *	18.70 *	完全切断
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.2	20.21	15.25	0.75	370.1	116.2	1.523	18.55 *	18.80 *	完全切断
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3	20.32	15.45	0.76	370.1	118.9	1.525	18.55 *	18.70 *	完全切断
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.4	19.84	15.47	0.78	370.4	119.7	1.550	18.55 *	18.65 *	完全切断
SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.5	20.07	15.41	0.77	370.2	114.5	1.483	18.60 *	18.70 *	完全切断
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.1	20.26	15.24	0.75	370.0	116.3	1.525	18.55 *	18.70 *	完全切断
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.2	20.35	15.44	0.76	370.1	116.4	1.493	18.65 *	18.80 *	完全切断
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3	20.17	15.49	0.77	370.1	122.6	1.572	18.55 *	18.80 *	完全切断
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.4	20.22	15.38	0.76	369.9	122.7	1.589	18.50 *	18.60 *	完全切断
SP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.5	20.08	15.40	0.77	370.2	120.6	1.563	18.60 *	18.65 *	完全切断

W<sub>1</sub>: 爆薬幅 [実測値], H<sub>1</sub>: 爆薬高さ [実測値],  $\kappa_1$ : 形状係数 [実測値], \*: 鋼板板厚の最大・最小値を示す

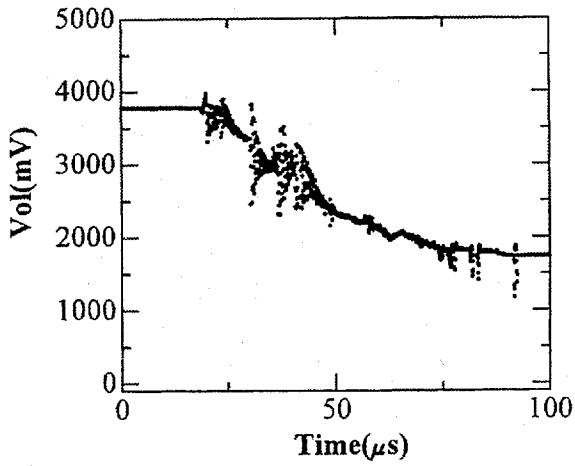
#### 4.3.2 爆轟速度の計測結果

本節では、4.2.5節で計画した抵抗線法により計測し、抵抗線から直接得られた電圧と時間との関係を図4-3-1(a)~(j)に示す。

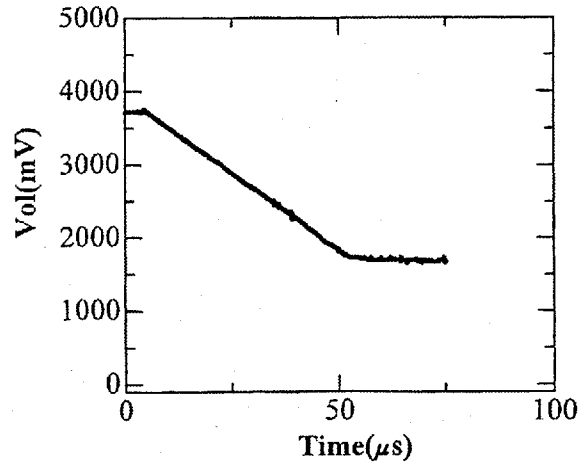
同図中の(a), (c), (e), (h)では多くのノイズを拾っており、安定した電圧の低下を計測することができなかった。また、同図(i)に示す試験体では、他の試験体に比べて当初の電圧が極端に低い値を示していることから、抵抗線の状態が不安定であったと考えられる。一方、同図中の(b), (d), (f), (g), (j)ではほとんどノイズを拾っておらず、ほぼ直線的な負勾配で電圧が低下していることから、正確な爆轟速度を計測できたものと考えられる。

ここで同図中の(d)と(g)について解析を行い、爆轟速度と抵抗線の距離との関係を示したものが図4-3-2(a), (b)である。同図(a)はライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用い水平方向にセットした場合の爆轟速度を示しており、同図(b)はライナー材に鋼板を用い鉛直方向にセットした場合の爆轟速度を示している。

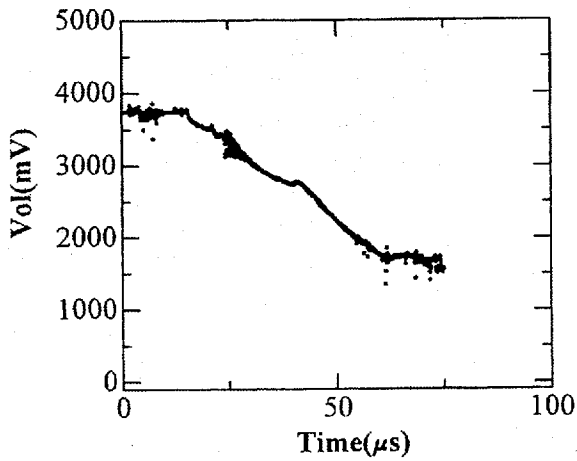
同図(a), (b)から、いずれのライナー材の材質に対しても爆轟速度は7,000m/sec程度に達しており、定常爆轟状態(起爆開始直後と爆発終了直前を除き、爆轟速度がほぼ一定になる状態)になっていることが確認できた。また、試験体の設置方向に関係なく同程度の爆轟速度が得られたことから、爆轟速度は重力に関係なく一定であり、鋼板の切断効果も重力の影響を受けることなく成形爆薬のライナー材がセットされた方向に対し十分大きな切断効果を発揮することが明らかとなった。



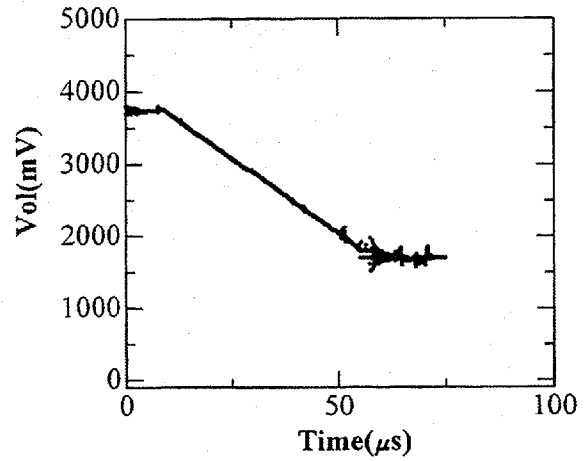
(a) SP19-Z08R30A20-K075-S10-D2 No.1 試験体



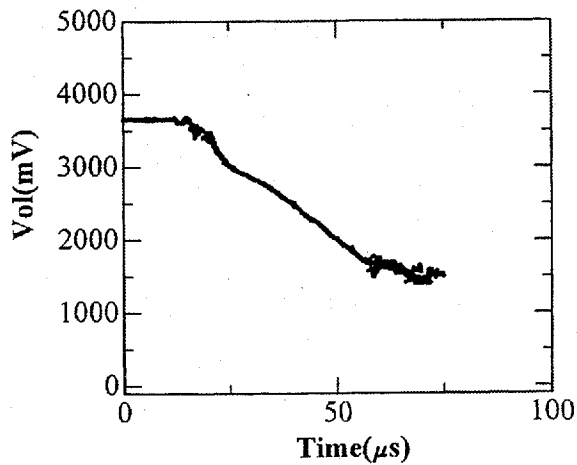
(b) SP19-C08R30A20-K075-S10-D2 No.1 試験体



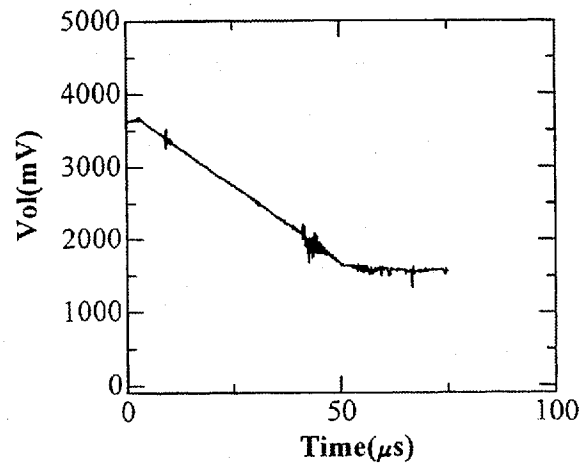
(c) SP19-Z08R30A20-K075-S10-D2 No.2 試験体



(d) SP19-C08R30A20-K075-S10-D2 No.2 試験体



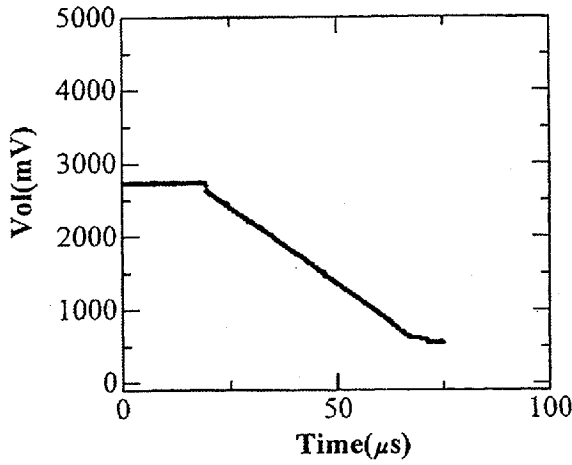
(e) SP19-Z08R30A20-K075-S10-D2 No.3 試験体



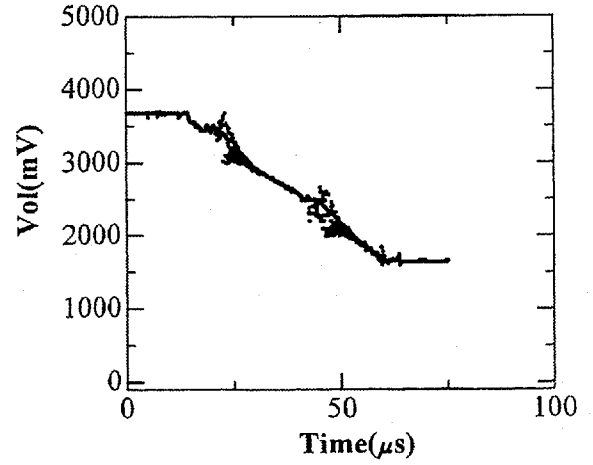
(f) SP19-C08R30A20-K075-S10-D2 No.3 試験体

図4-3-1 電圧と時間の関係

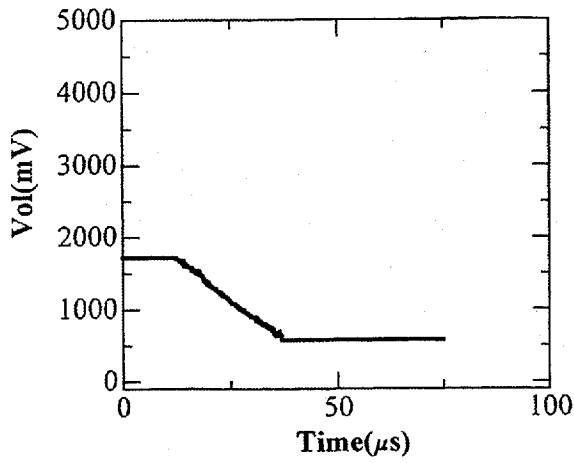




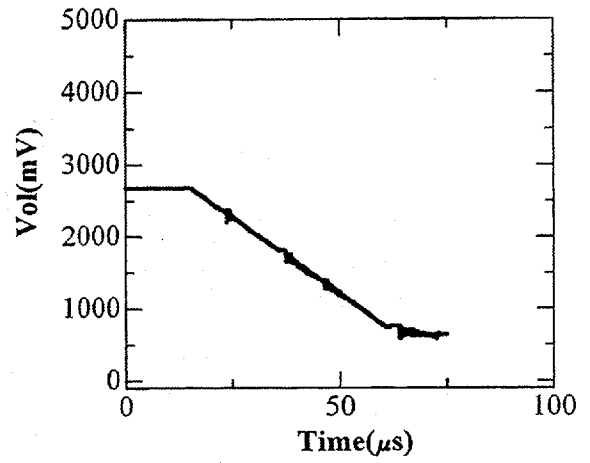
(g) SP19-Z08R30A20-K075-S10-D2 No.4 試験体



(h) SP19-C08R30A20-K075-S10-D2 No.4 試験体

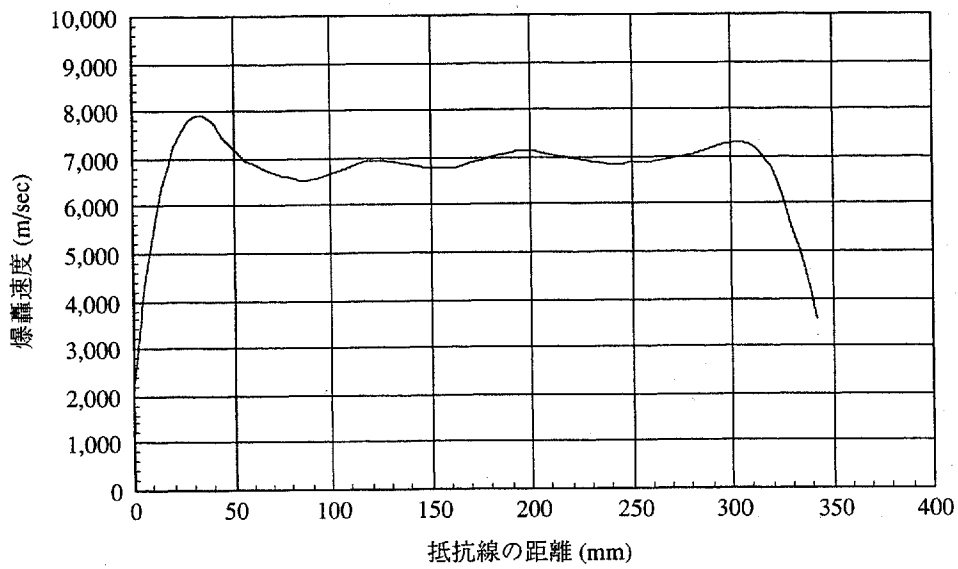


(i) SP19-Z08R30A20-K075-S10-D2 No.5 試験体

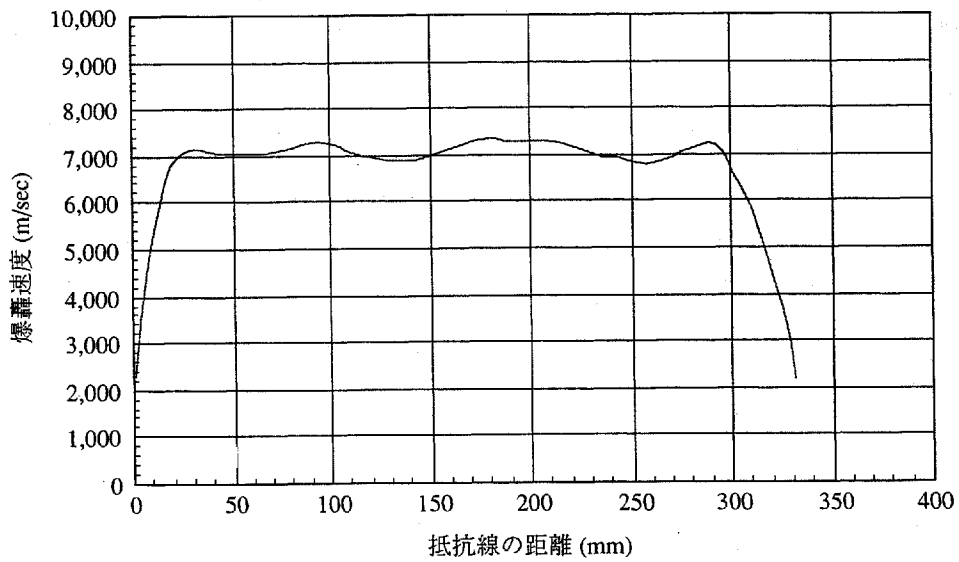


(j) SP19-C08R30A20-K075-S10-D2 No.5 試験体

図4-3-1 電圧と時間の関係



(a) SP19-Z08R30A20-K075-S10-D2 No.4 試験体



(b) SP19-C08R30A20-K075-S10-D2 No.2 試験体

図4-3-2 爆轟速度と抵抗線の距離との関係

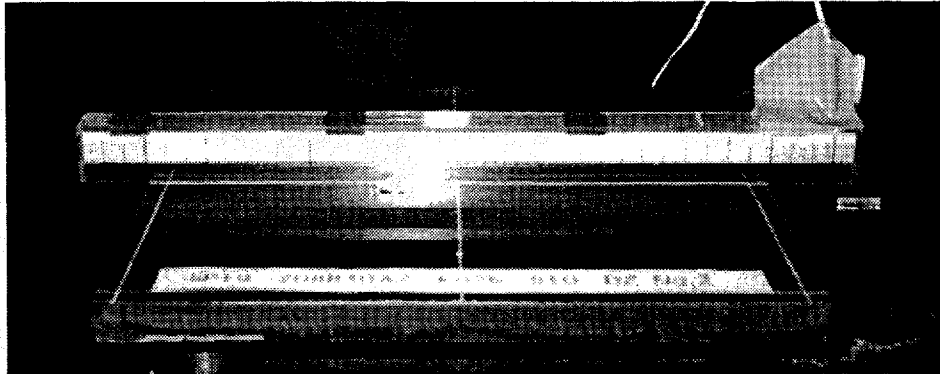
## 4.3.3 高速度カメラによる写真撮影結果

本節では、4.2.2節で計画した2種類の撮影方向(図4-2-1, 写真4-3-1参照)に基づき、高速度カメラを用いて2 $\mu\text{sec}$ 毎に写真撮影を行った。その撮影結果を写真4-3-2, 4-3-3に示す。

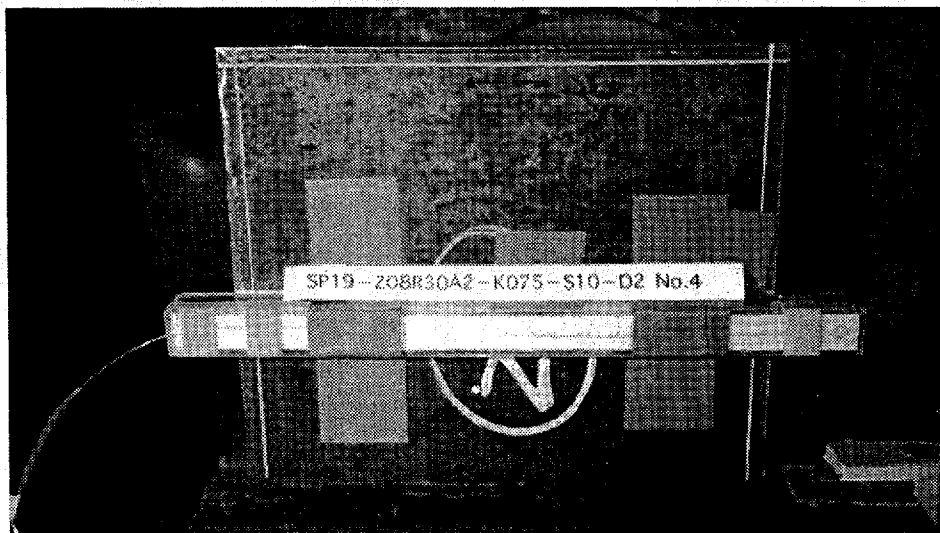
写真4-3-2は側面から撮影したSP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.2 試験体で、起爆から26 $\mu\text{sec}$ 後～54 $\mu\text{sec}$ 後まで2 $\mu\text{sec}$ 毎の結果である。同写真から、爆轟速度とライナーカッターが鋼板に衝突する速さの間隔はほぼ同時であることが確認できる。また、ライナーカッターが鋼板に衝突する直前に光を発する現象が見られるが、この現象はメタルジェットが鋼板に衝突した際に発する火花と、ライナー材と鋼板との間で空気が急激に圧縮され発光するものであると思われる。

写真4-3-3は正面から爆轟が近づいてくるように撮影したSP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.4 試験体で、起爆から32 $\mu\text{sec}$ 後～54 $\mu\text{sec}$ 後まで2 $\mu\text{sec}$ 毎の結果である。同写真からもライナーカッターが鋼板に衝突する直前に光を発する現象が確認できる。また、ライナー材が衝撃波等によって変形を開始し、鋼板に衝突するまでの過程が克明に示されており、モンロー効果で知られるメタルジェットのような影を確認することができる。

これら2つの写真から、爆轟の進行に伴いライナーカッターが鋼板に衝突しているにも関わらず、爆薬ケースおよび鋼板の設置位置が変化しないことが確認できる。この現象は、爆轟速度が空気の音速の約20倍(図4-3-2参照)に達しており、衝撃力の発生時間は数10 $\mu\text{sec}$ と比較的短時間で終了していることから、衝撃力が鋼板内部を伝播する前に切断現象が終了しているものと考えられる。

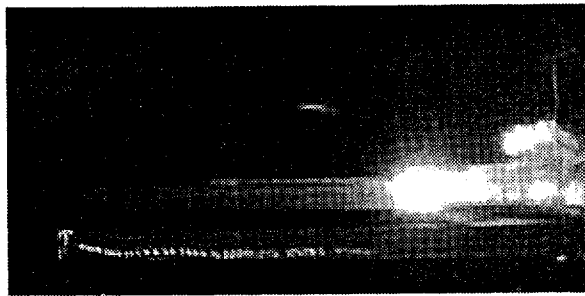


(a) 爆発現象を水平方向(側面)から撮影するタイプ  
(SP19-Z08R30A20-K075-S10-D2 No.2 試験体)

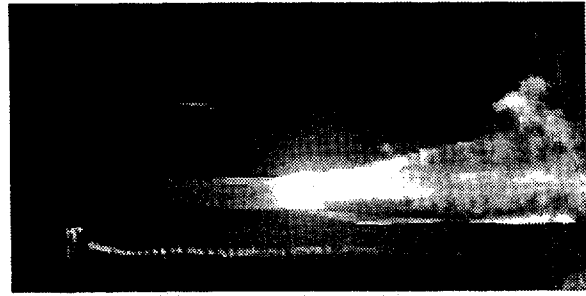


(b) 爆発現象を鉛直方向(正面)から撮影するタイプ  
(SP19-Z08R30A20-K075-S10-D2 No.4 試験体)

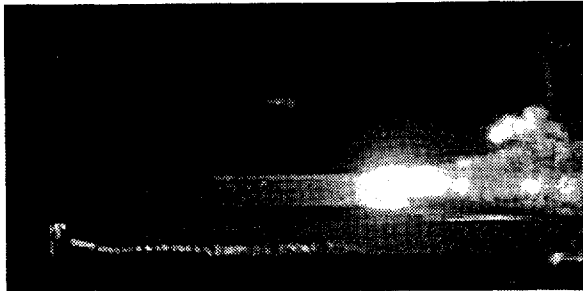
写真4-3-1 起爆直前の試験体の設置状況



起爆開始から 26  $\mu$ sec 後



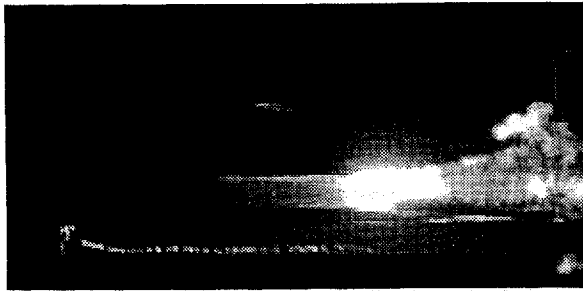
36  $\mu$ sec 後



28  $\mu$ sec 後



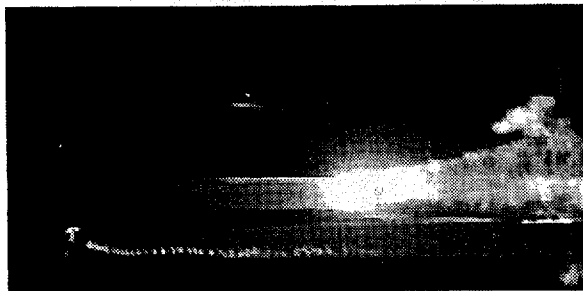
38  $\mu$ sec 後



30  $\mu$ sec 後



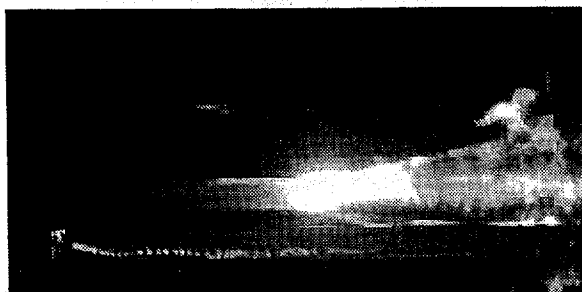
40  $\mu$ sec 後



32  $\mu$ sec 後



42  $\mu$ sec 後



34  $\mu$ sec 後



44  $\mu$ sec 後

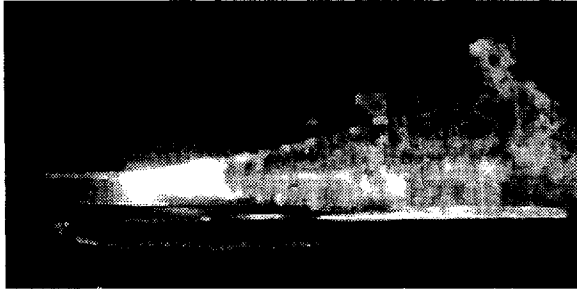
写真 4-3-2 爆発現象を水平方向(側面)から撮影した結果  
(SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.2 試験体)



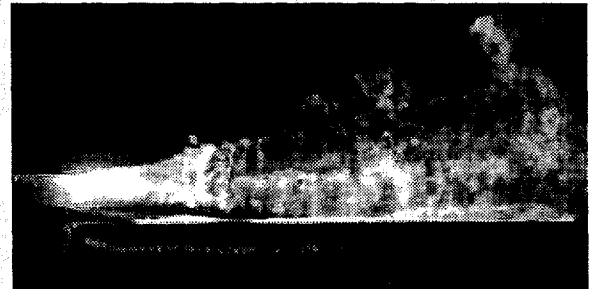
46  $\mu$ sec 後



52  $\mu$ sec 後



48  $\mu$ sec 後

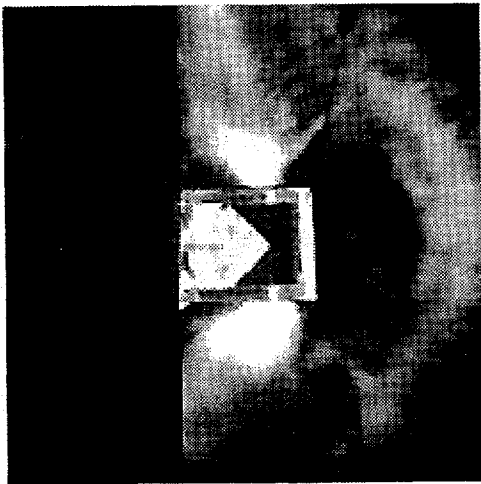


54  $\mu$ sec 後

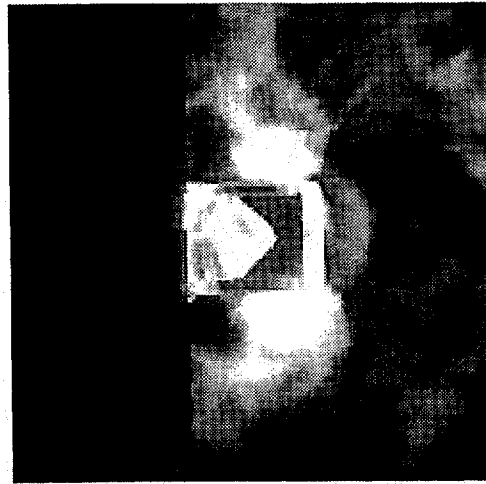


50  $\mu$ sec 後

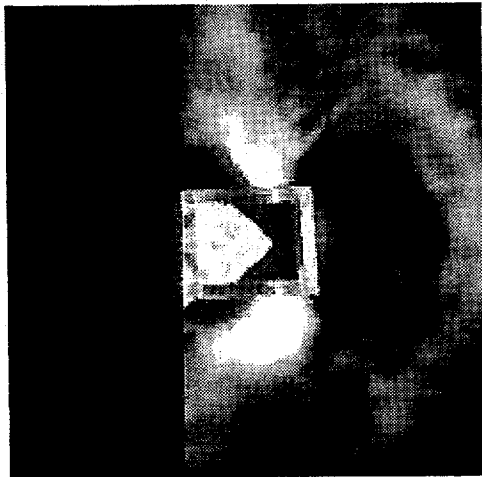
写真4-3-2 爆発現象を水平方向(側面)から撮影した結果  
(SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.2 試験体)



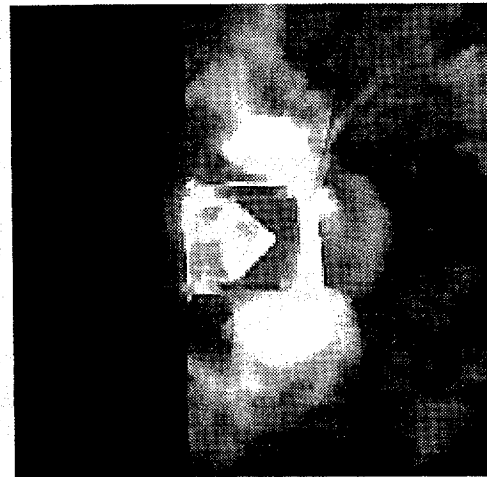
起爆開始から 32  $\mu$ sec 後



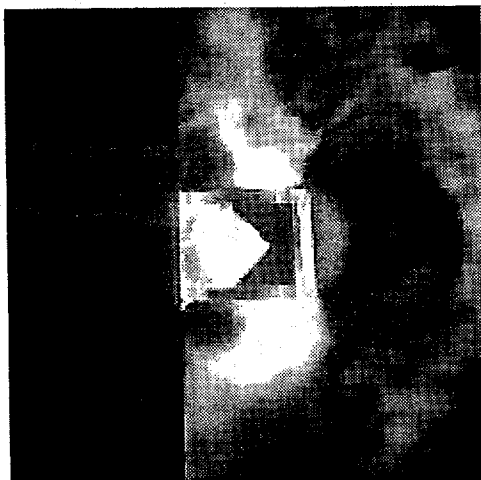
38  $\mu$ sec 後



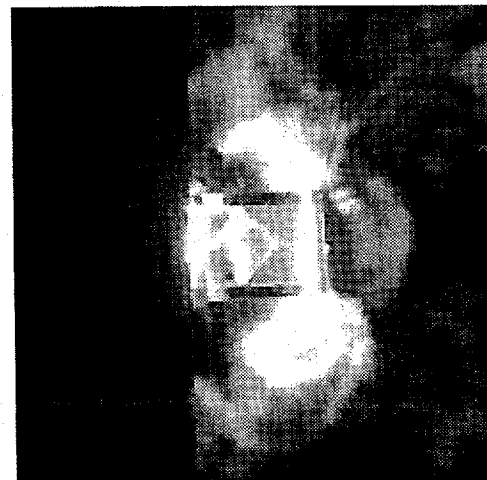
34  $\mu$ sec 後



40  $\mu$ sec 後



36  $\mu$ sec 後



42  $\mu$ sec 後

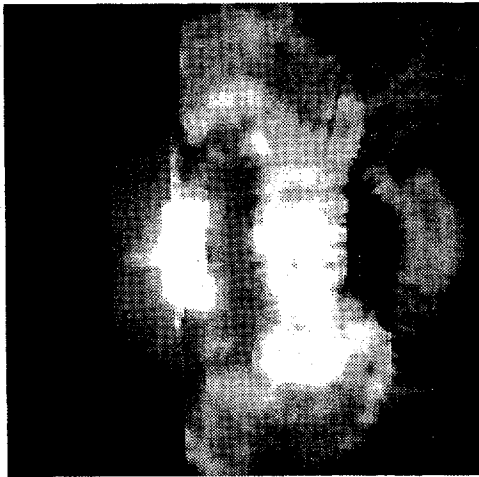
写真4-3-3 爆発現象を鉛直方向(正面)から撮影した結果  
(SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.4 試験体)



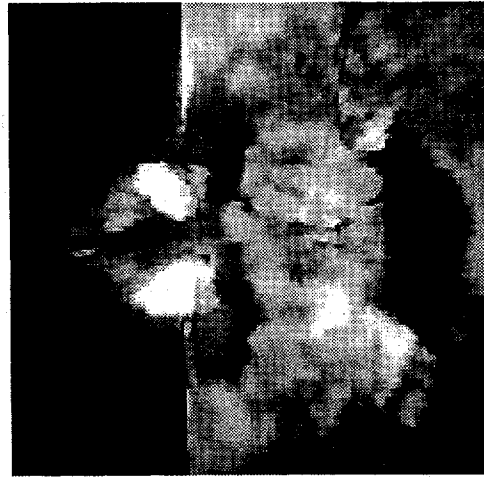
44  $\mu$ sec 後



50  $\mu$ sec 後



46  $\mu$ sec 後



52  $\mu$ sec 後



48  $\mu$ sec 後



54  $\mu$ sec 後

写真4-3-3 爆発現象を鉛直方向(正面)から撮影した結果  
(SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.4 試験体)

#### 4.3.4 鋼板の残留歪分布について

一般に定説となっている成形爆薬による鋼板の切断メカニズムは、ライナー材の一部が溶融して発生するメタルジェット(平均速度は数km/sec～11km/secに達すると言われてている)により切断される現象であり、モノロー効果(図2-6-2参照)として説明されている。このメタルジェットは爆薬が爆轟しないと発生しないことから、これが飛び出す速度は鋼板の音速(弾性波)以上爆轟速度以下であると考えられ、鋼板の切断がメタルジェットによる効果であれば鋼板の塑性変形は目立たないことになる。

しかし、第3章で実施した成形爆薬による鋼板の切断実験では、いずれのライナー材の材質に対しても、実験終了後の鋼板の切断面近くに肉眼で確認できるほどの塑性変形が発生していた。この現象から、成形爆薬による鋼板の切断効果は、メタルジェットよりもむしろライナーカッターに左右されているものと思われ、ライナーカッターの進行速度が、鋼板内部でライナーカッターと鋼板との摩擦によって応力伝播速度近くまで減速し、この摩擦抵抗によって塑性変形が生じたものと考えられる。

そこで本節では、成形爆薬による鋼板の切断メカニズムを解明するための一手法として、SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.1～No.2およびSP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.1～No.2の試験体4体に対し予め鋼板上面に標点(図4-3-3)を設置し、実験前後の各標点間の計測結果から残留歪分布を求める手法を採用した。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図4-3-4に示す。

同図(a)に示すライナー材が溶融垂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、溶融垂鉛めっき鋼板に比べて切断面近くの歪の変化が大きく、広範囲で縮む傾向が見られた。

この現象の違いは、実験終了後に回収したライナーカッターを観察すると、ライナー材が溶融垂鉛めっき鋼板の場合はライナーカッターが刃物状に変形した形で鋼板を貫通したことが確認でき、ライナー材が銅板の場合はライナーカッターが一度溶融した形で鋼板を貫通したことが確認できたことから、このライナーカッターが鋼板を貫通する過程での形状とライナー材の溶融温度の違い(固体か液体)によって歪が集中する箇所に違いが生じたものと考えられる。(鋼板の切断メカニズムについては本章4.6節参照)

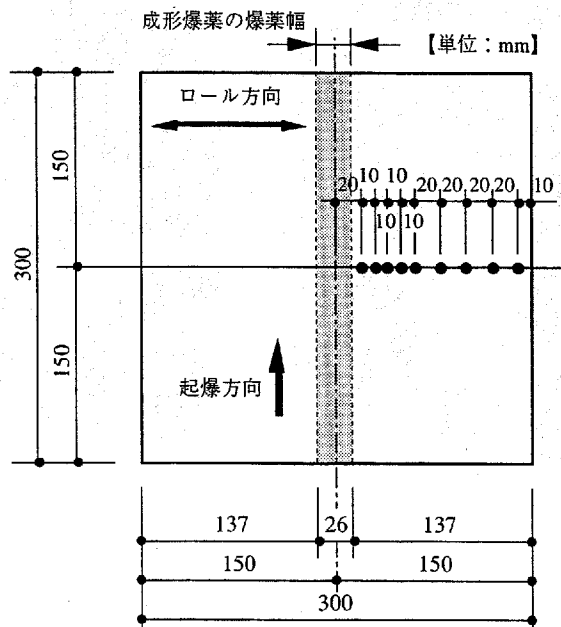


図4-3-3 残留歪を計測するための標点位置



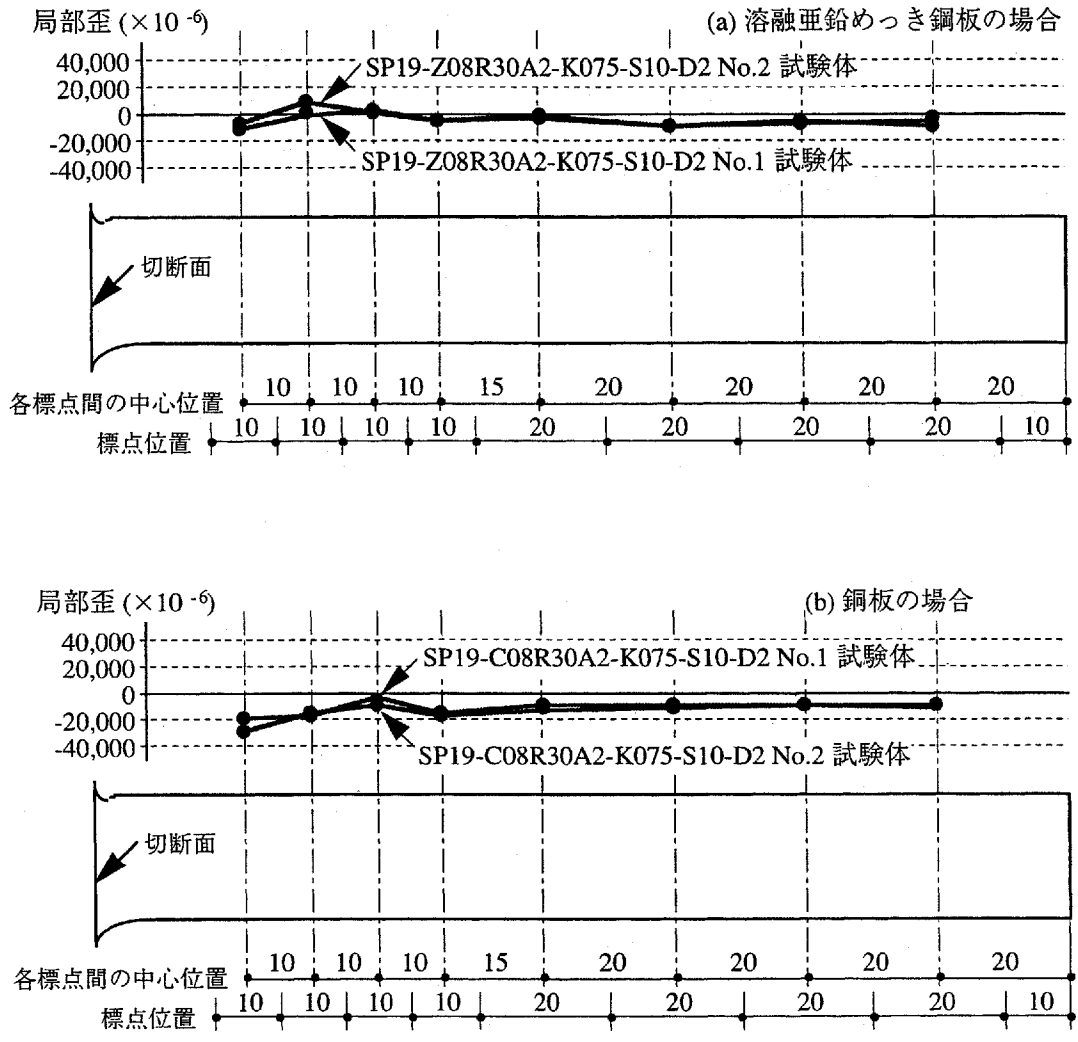


図4-3-4 ライナー材の材質の違いによる鋼板の残留歪分布

#### 4.4 冶金的分析の方法

##### 4.4.1 鋼板の化学成分の分析方法

前節でも述べたように、成形爆薬による鋼板の切断現象においてモンロー効果によるメタルジェットが100%鋼板を切断しているのであれば、切断現象を途中で止めた切欠き試験体の切欠き面近傍において化学成分分析(以降、成分分析と記す)を行うと、母材内部に溶融して食い込んだライナー材の成分が多く析出されると考えられる。

そこで本節では、第3章で用いた実験終了後の鋼板の内、SM490A鋼材、SA440B鋼材、HITEN690B鋼材およびHITEN780B鋼材の5種類で板厚の約2/3(12mm)まで切欠いた鋼板と、SM490A鋼材で完全切断した鋼板(共にNo.3試験体)の2ケースを用い、ライナー材が溶融亜鉛めっき鋼板と銅板の2種類をパラメータとした計20体について成分分析を(株)日鐵テクノリサーチ関西事業所で実施することにした。

成分分析の種類は、C, Si, Mn, P, S, Cu, Ni, Cr, Znの9成分とし、C, Sの2成分に対する分析方法はJIS G 1211の赤外線吸収法(CS-444/LECO製)を、その他の成分にはJIS G 1215の誘導結合プラズマ発光分析法(ICP法; ICPV-1017/(株)島津製作所製)を採用することにした。

鋼板の成分分析を行う面は図4-4-1に示す分析箇所[断面]とし、成分分析箇所は図4-4-2に示す切断面または切欠き面近傍の分析点1と、熱影響等が少ない分析点2の2箇所を設定し、比較することにした。

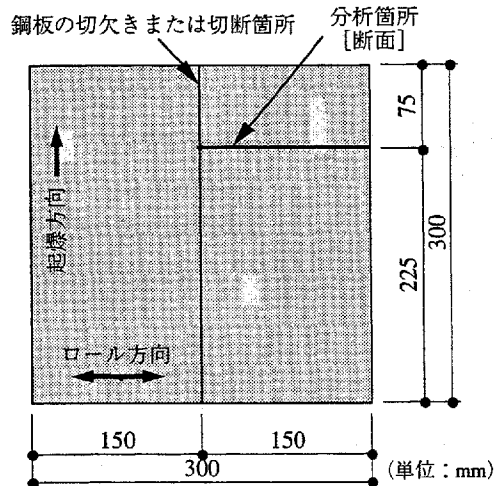


図4-4-1 実験終了後の鋼板に対する分析箇所

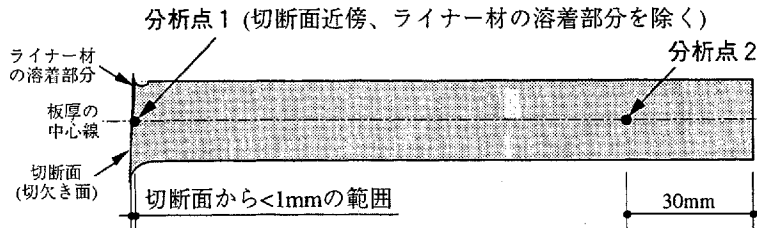


図4-4-2 化学成分の分析箇所

4.4.2 顕微鏡による組織変化の撮影計画

本研究で実施した全試験体において、成形爆薬による鋼板の切断または切欠いた直後の破断面の温度は、手で触れることのできる程度で急激な温度上昇は認められなかった。この現象として考えられることは、ライナーカッターが鋼板を貫通した直後は急激な温度上昇があるものの後ガスにより急冷されると言う考え方と、成形爆薬の爆発熱は急激な高温状態になるものの、ライナー材および鋼板の熱伝達速度をはるかに超えているため、鋼板の温度上昇は起こらないと言う考え方の2つに分けられる。

もし前者の考え方の場合、製鉄所における構造用鋼板の製造工程は、熱間圧延であることから900℃前後で圧延し一気に水冷する工程を踏むためオーステナイト系の鋼であるが、鋼板の切断過程で温度上昇と急冷が発生するとフェライト相を含む組織に変化(図4-4-3参照)すると思われる。一方、後者の考え方の場合は結晶の変化は起こらず、圧延過程で生成するメタルフローに変化が生じるものと思われる。

そこで本章では、成形爆薬の爆轟に伴う衝撃力に対する鋼板の抵抗と切断面(切欠き面)近傍の組織変化を把握するため、(株)日鐵テクニカ研究所が所有する投影機(Profile Projector V-12/NIKON製)によるマクロ組織(倍率;×10)と光学顕微鏡(DMR/Leitz製)によるミクロ組織(倍率;×200)を写真撮影することにした。なお、試験体は第3章の3.4.5節に示す硬度分布および前節の成分分析結果と整合させるため、SM490A鋼材で板厚の約2/3(12mm)まで切欠いた鋼板と完全切断した鋼板(共にNo.3試験体)の2ケースを用い、ライナー材の材質の違いによる組織の変化から切断メカニズムを考察することにした。

この顕微鏡による組織の撮影面は、図4-4-1に示す分析箇所と同じ断面とし、各組織の撮影箇所は図4-4-4に示す通りである。

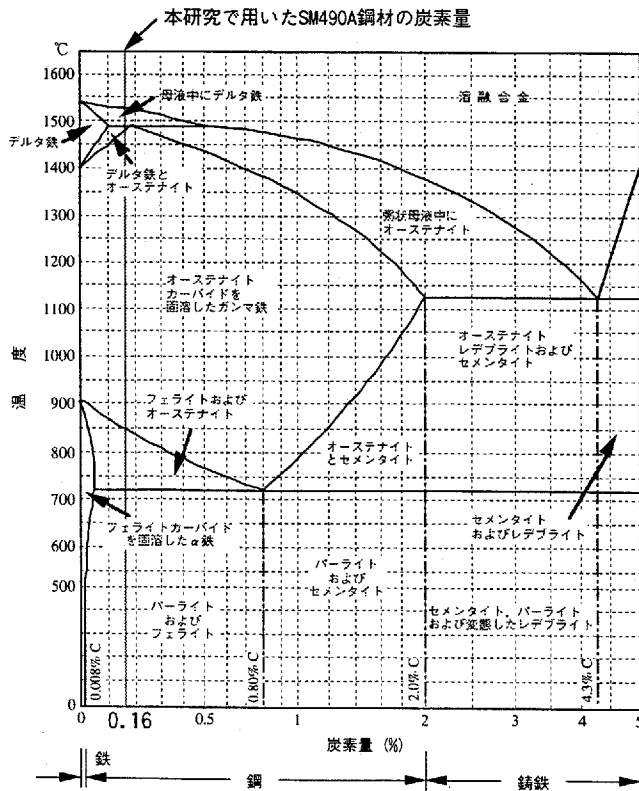
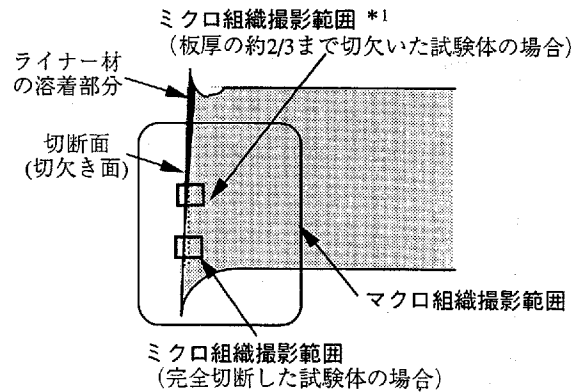


図4-4-3 鉄・炭化鉄系平衡状態図



\*1: ミクロ組織の撮影範囲は、ライナー材が止まった箇所を中心にライナー材の溶着部分と母材が写る範囲とする。

図4-4-4 顕微鏡による組織撮影箇所

## 4.5 冶金的分析の結果と考察

## 4.5.1 鋼板の化学成分の分析結果

図4-4-2に示した分析点1, 2における各化学成分の分析結果を表4-5-1に示す。

同表から、鋼板の切欠き深さ、ライナー材の材質に関係なく、全ての試験体における分析点1と分析点2の各成分を比較してもほとんど変化していないことが確認できる。また、第3章の表3-3-2に示すSM490A鋼材、SA440B鋼材、HITEN690B鋼材およびHITEN780B鋼材の化学成分(ミルシート値)と比較してもほとんど変化していないことが分かる。

このことから、成形爆薬の爆発熱は急激な高温状態になるものの、ライナー材および鋼板の熱伝達速度をはるかに超えているため、ライナーカッターは熱伝達を受けないまま鋼板に衝突しているものと思われる。その結果、鋼板内部にはライナー材の成分が析出されなかったものと考えられる。

表4-5-1 化学成分の分析結果

(単位：%)

試験体名称	分析箇所	C <sup>*1</sup>	Si <sup>*2</sup>	Mn <sup>*2</sup>	P <sup>*2</sup>	S <sup>*1</sup>	Cu <sup>*2</sup>	Ni <sup>*2</sup>	Cr <sup>*2</sup>	Zn <sup>*2</sup>
MP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	分析点1	0.16	0.34	1.39	0.010	0.002	<0.01	0.04	0.07	<0.01
	分析点2	0.16	0.33	1.40	0.009	0.002	<0.01	0.04	0.08	<0.01
MP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3	分析点1	0.16	0.34	1.40	0.010	0.002	<0.01	0.03	0.06	<0.01
	分析点2	0.16	0.34	1.40	0.010	0.002	<0.01	0.04	0.06	<0.01
MP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	分析点1	0.16	0.33	1.38	0.009	0.002	<0.01	0.03	0.06	<0.01
	分析点2	0.16	0.33	1.40	0.010	0.002	<0.01	0.04	0.07	<0.01
MP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3	分析点1	0.16	0.34	1.39	0.009	0.002	<0.01	0.03	0.07	<0.01
	分析点2	0.16	0.34	1.39	0.009	0.002	<0.01	0.03	0.06	<0.01
AP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	分析点1	0.12	0.24	1.33	0.010	0.002	0.17	0.21	0.09	0.011
	分析点2	0.12	0.25	1.35	0.010	0.002	0.18	0.21	0.09	0.001
AP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	分析点1	0.12	0.25	1.36	0.010	0.002	0.18	0.21	0.09	0.001
	分析点2	0.12	0.24	1.35	0.011	0.002	0.18	0.21	0.09	0.001
H7P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	分析点1	0.11	0.27	0.93	0.005	0.001	0.21	1.04	0.45	0.002
	分析点2	0.11	0.27	0.94	0.005	0.001	0.21	1.04	0.45	0.002
H7P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	分析点1	0.11	0.27	0.94	0.007	0.001	0.21	1.04	0.45	0.002
	分析点2	0.11	0.27	0.93	0.005	0.001	0.21	1.04	0.45	0.002
H8P19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3	分析点1	0.11	0.27	0.93	0.007	0.001	0.21	1.04	0.45	0.002
	分析点2	0.11	0.27	0.93	0.005	0.001	0.21	1.04	0.45	0.004
H8P19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3	分析点1	0.11	0.27	0.94	0.005	0.001	0.21	1.04	0.45	0.002
	分析点2	0.11	0.27	0.94	0.004	0.001	0.21	1.04	0.45	0.002

\*1：赤外線吸収法(JIS G 1211), \*2：誘導結合プラズマ発光分光分析法(JIS G 1215), <：この値以下を示す

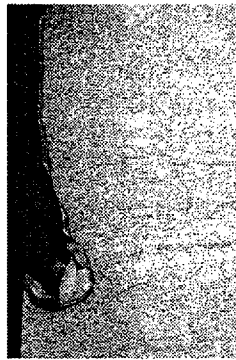
#### 4.5.2 顕微鏡による組織変化の撮影結果

顕微鏡による組織の写真撮影結果を写真4-5-1~4に示す。なお、写真4-5-1はライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用い12mmまで切欠いた場合の組織を、写真4-5-2はライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用い完全切断した場合の組織を、写真4-5-3はライナー材に銅板を用い12mmまで切欠いた場合の組織を、写真4-5-4はライナー材に銅板を用い完全切断した場合の組織を表している。また、各写真内の画像(a)はマクロ組織( $\times 10$ )を示し、画像分析(b)は画像(a)におけるライナー材の残材を除いた鋼板のメタルフローを5~7層ごとにまとめて模式化した画像分析結果を示している。画像(c)は画像分析(b)内の□で囲んだ範囲内のミクロ組織( $\times 200$ )を表している。

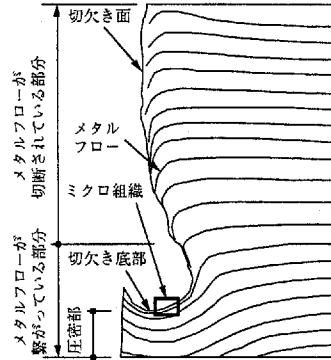
各写真内の画像(a)から、全ての試験体における切欠き面、切断面共にライナー材の一部がめっき状に付着していることが確認できる。また、この付着した境界近傍では少し色の変化が見られるものの、お互いに溶融し合金が生成した痕跡は認められない。(表4-5-1中の分析点1のCu, Zn 参照)

各写真内の画像(b)から、いずれのライナー材の材質に対しても12mmまで切欠いた鋼板の場合では、メタルフローが切断されている部分が確認できるものの、切欠き底部のメタルフローはつながっており、底部以降は高圧力が加わり密な状態(以後、圧密状態と記す)になるとと思われる。一方、完全切断の場合、全断面に渡ってメタルフローが切断されており、ライナーカッターが貫通する直前のメタルフローの変形は大きくなる傾向を示している。なお、ライナー材に銅板を用いた場合のメタルフローの変形は、溶融亜鉛めっき鋼板を用いた場合よりも全体的に大きくなる傾向にある。

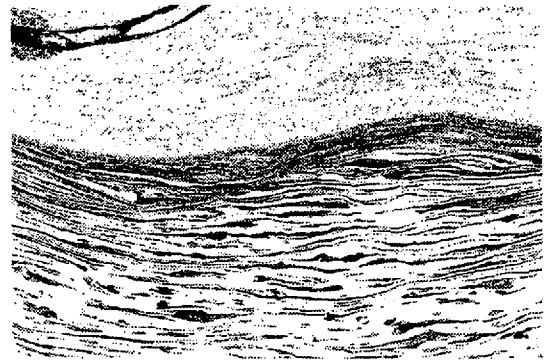
各写真内の写真(c)から、どの試験体においてもメタルフローを鮮明に確認することができ、爆発熱または摩擦熱等による溶融や再結晶化は認められない。なお、全ての鋼板内部にはラメラティア割れやボイド等の欠陥は見られなかった。また、写真4-5-1,3の写真(c)からも、ライナーカッターによる鋼板の切欠き底部のメタルフローは連続的につながっていることが確認でき、圧密状態になっていることから、第3章の図3-4-10~15に示した硬度分布においても、切断面(または切欠き面)近傍の硬度が他に比べて高くなる傾向を示したものと思われる。



(a) マクロ組織 (×10)

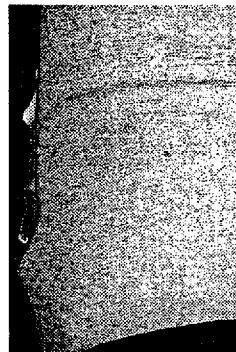


(b) マクロ組織の画像分析

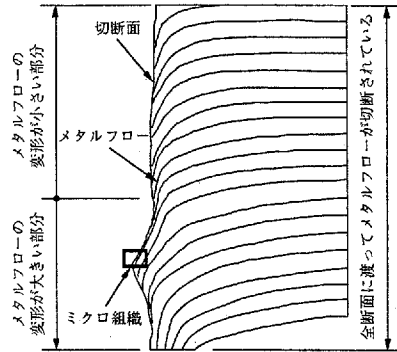


(c) ミクロ組織 (×200)

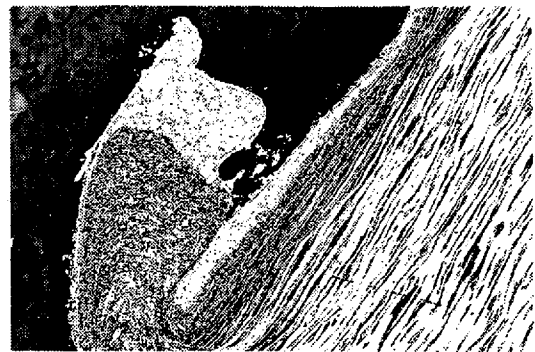
写真5-5-1 MP19-Z08R30A2-K075-S08-D2 No.3 試験体の組織および画像分析結果



(a) マクロ組織 (×10)

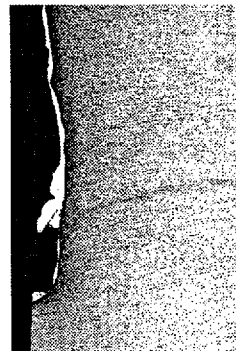


(b) マクロ組織の画像分析

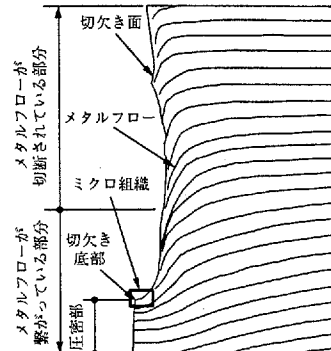


(c) ミクロ組織 (×200)

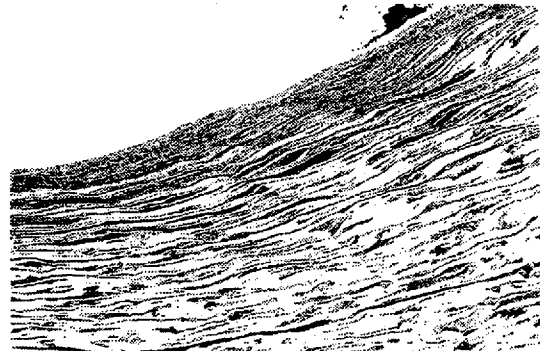
写真5-5-2 MP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.3 試験体の組織および画像分析結果



(a) マクロ組織 (×10)

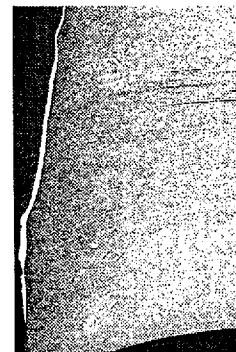


(b) マクロ組織の画像分析

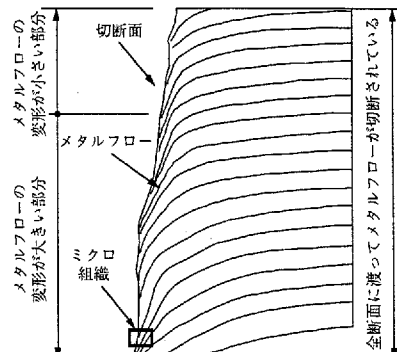


(c) ミクロ組織 (×200)

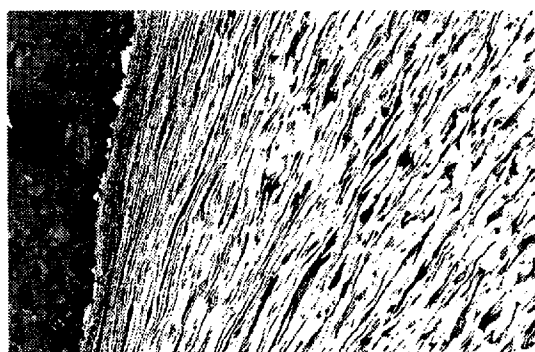
写真5-5-3 MP19-C08R30A2-K075-S08-D2 No.3 試験体の組織および画像分析結果



(a) マクロ組織 (×10)



(b) マクロ組織の画像分析



(c) ミクロ組織 (×200)

写真4-5-4 MP19-C08R30A2-K075-S10-D2 No.3 試験体の組織および画像分析結果

## 4.6 衝撃破壊メカニズムの一考察

### 4.6.1 高速度カメラによる写真撮影結果に基づく衝撃破壊メカニズム

本節では、高速度カメラによる写真撮影結果を画像分析することにより、成形爆薬による鋼板の切断メカニズムを解明する。そこで、4.3.3節で示した写真4-3-2の中から広範囲に渡って分析可能なショットとして起爆から50 $\mu$ sec後の写真を使用することにした。この画像分析結果を図4-6-1に示す。

同図から、衝撃波の境界と思われる線と後ガスの膨張境界線が鮮明に判断でき、これらの直線をペントライトの充填境界線に対して線対称にすると、それぞれメタルジェットと鋼板の接点およびライナーカッターと鋼板の接点と思われる点に合致する。このことから、メタルジェットの飛び出す速度は衝撃波の膨張速度と関係があり、ライナーカッターが鋼板に衝突する速度は後ガスの膨張速度と関係があるものと考えられる。この現象を含む鋼板内部の挙動と鋼板が切断される順序を図化したものを図4-6-2に示す。

同図中、 $\theta_1$ はペントライトの充填境界と後ガスの膨張境界線との交角およびライナーカッターが鋼板に衝突する角度を示しており、 $\theta_2$ はペントライトの充填境界と衝撃波の境界線との交角およびメタルジェットが鋼板に衝突する角度を示している。なお、メタルジェットが鋼板に衝突する前に発光が起こる現象の一つは空気が急激に圧縮されることによる発光と、もう一つは図中に示すようにShock-Induced Combustion<sup>4)</sup>(衝撃波が誘起する燃焼)と呼ばれる衝撃波の境界前方に燃焼現象が起こることが知られており、これらの現象が入り交じった状態を示している。

同図において、成形爆薬による鋼板の切断メカニズムの過程を順次追って行くと次のようになる。

- ①：衝撃波の通過前
- ②：Shock-Induced Combustionおよびメタルジェットの通過
- ③：ライナーカッターによる切断過程
- ④：ライナーカッターの通過直後

特に②では衝撃波によって鋼板上面に細かな凹凸を形成し、その直後にメタルジェットが鋼板に衝突しているものと考えられる。また、③ではメタルジェットによって鋼板内部に形成された切欠き溝に沿ってライナーカッターが進行するものと考えられる。

なお、ライナー材の一部が溶融しメタルジェットを生成する過程は、衝撃波の通過に伴う負圧によってライナー材の表層部に付着している酸化被膜とライナー材の組織の一部が粒子状に剥離し、互いの粒子がライナー材の中心線上で衝突することによって溶融しているものと考えられる。この現象を図化したものが図4-6-3である。

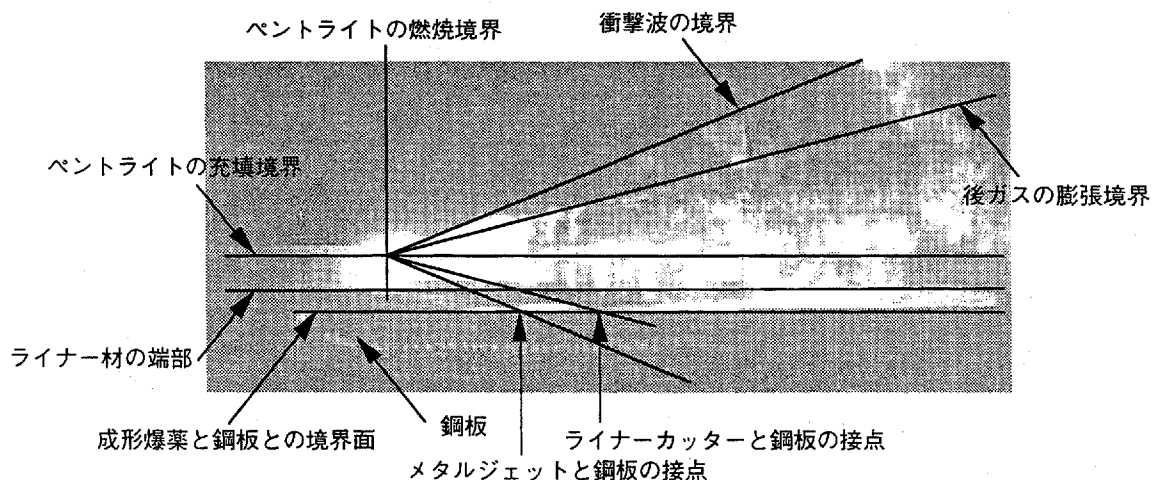


図4-6-1 SP19-Z08R30A2-K075-S10-D2 No.2 試験体における起爆から50 $\mu$ sec後の画像分析

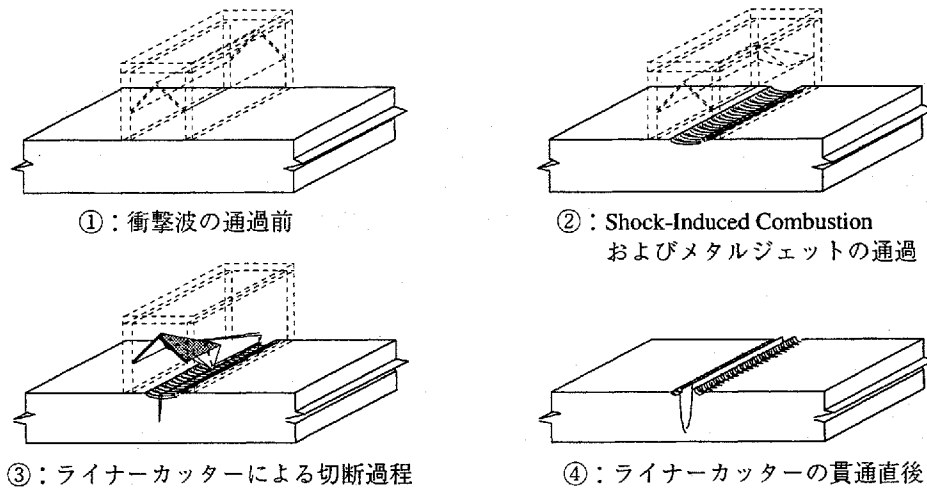
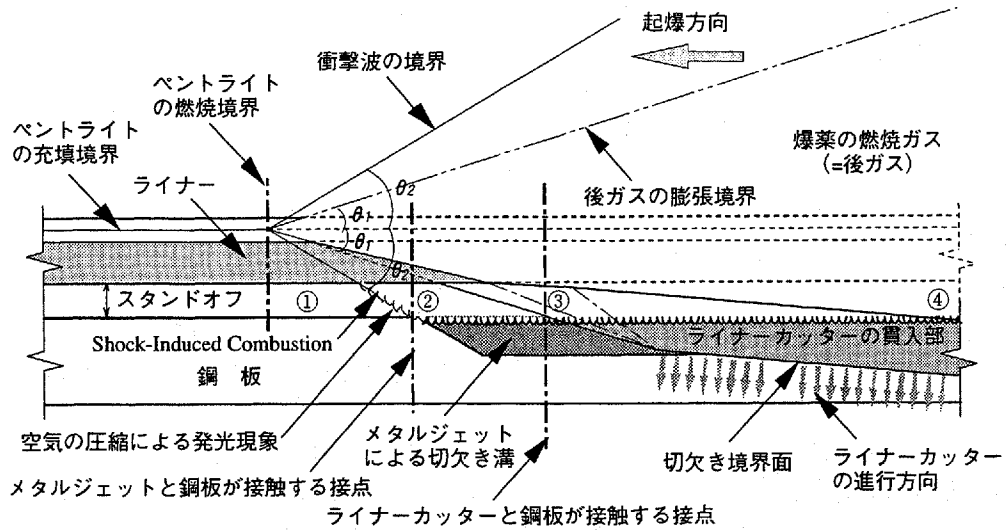


図4-6-2 高速度カメラによる画像分析から考察した切断メカニズムの過程

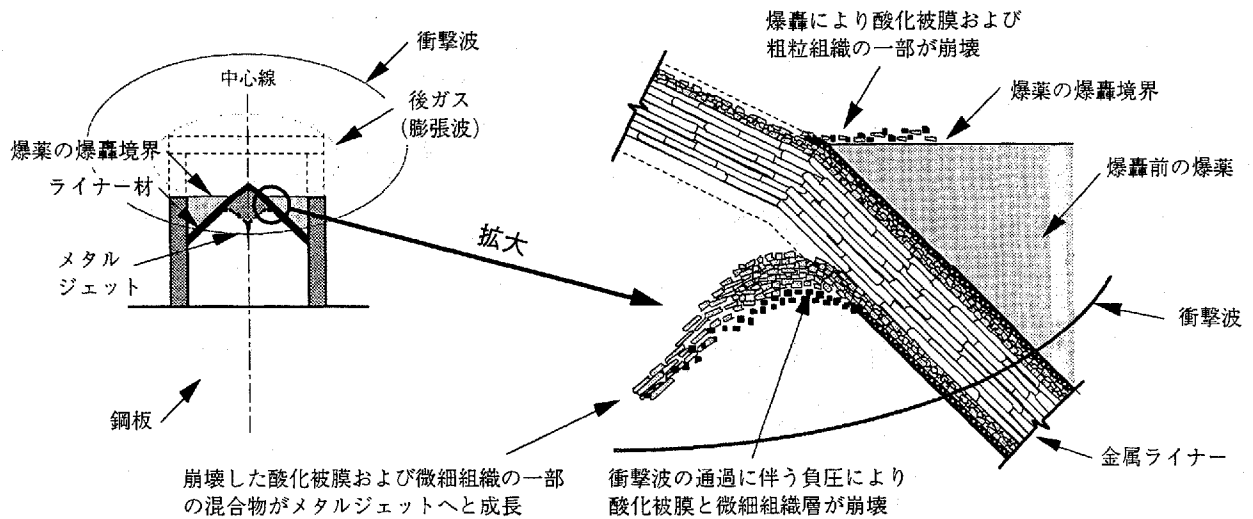


図4-6-3 メタルジェットの生成過程



4.6.2 鋼板の歪分布および硬度分布に基づく衝撃破壊メカニズム

本節では、実験終了後の鋼板を用いた歪分布の形状と鋼板の硬度分布の形状を総合して、成形爆薬による鋼板の切断メカニズムを解明する。

4.3.4節で示した図4-3-4における鋼板の残留歪分布と第3章の3.4.5節で示した図3-4-10~15における鋼板の硬度分布を参考に鋼板の切断メカニズムについて考察したものを図4-6-4に示す。同図中、左側はライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用いた場合を、右側は銅板を用いた場合を示している。

同図から、ライナー材が溶融亜鉛めっき鋼板の場合、ライナーカッター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で鋼板に衝突した後も固体を維持しているものと思われ、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切断面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と考えられる。その結果、図4-3-4(a)に示す残留歪分布のように切断面近くに歪が集中する傾向が表われ、図3-4-10に示す硬度分布においても切断面近傍の硬度が高くなる傾向が表われたものと考えられる。

一方、ライナー材が銅板の場合、ライナーカッターが鋼板に衝突する以前は固体を保っているものの、ライナーカッターが鋼板を貫通する過程で鋼板の抵抗を受けることにより圧縮され溶融してくるものと思われる。その結果、ライナーカッター先端の接触面が大きくなるほど鋼板の切断面が受ける抵抗力も大きくなり、図4-3-4(b)に示す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考えられる。ただし、図3-4-11に示す硬度分布において切断面近傍の硬度が高くなる傾向が表われたのは、メタルジェットによる下向きの衝撃力が大きいためと考えられる。

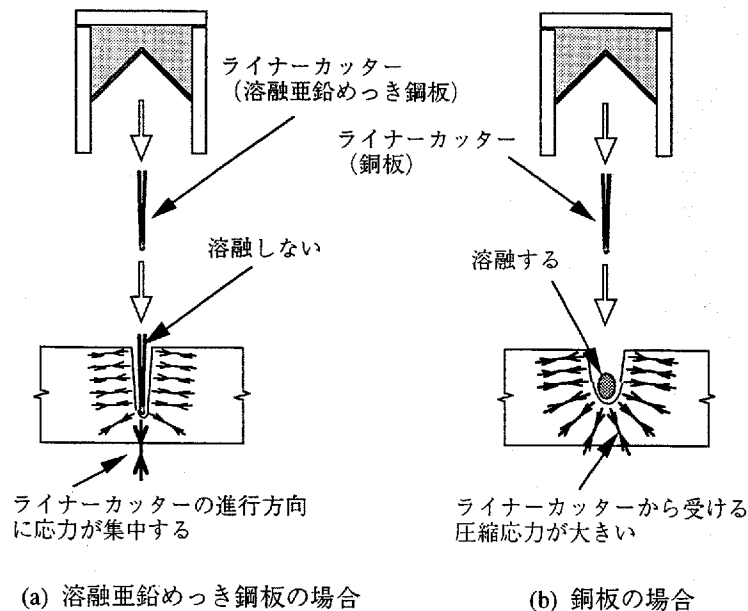


図4-6-4 鋼板の歪分布および硬度分布に基づく切断メカニズム

#### 4.6.3 冶金的分析の結果および切欠き分布に基づく衝撃破壊メカニズム

本節では、実験終了後の鋼板を用いた冶金的分析の結果と鋼板の切欠き分布の形状を総合して、成形爆薬による鋼板の切断メカニズムを解明する。

まず、前節で示した図4-6-4の切断メカニズムを参考に、4.5.2節で示した写真4-5-1~4におけるマクロ組織の画像分析の結果を付加し鋼板の切断メカニズムについて考察したものを図4-6-5に示す。同図中、左側はライナー材に溶融亜鉛めっき鋼板を用いた場合を、右側は鋼板を用いた場合を示している。

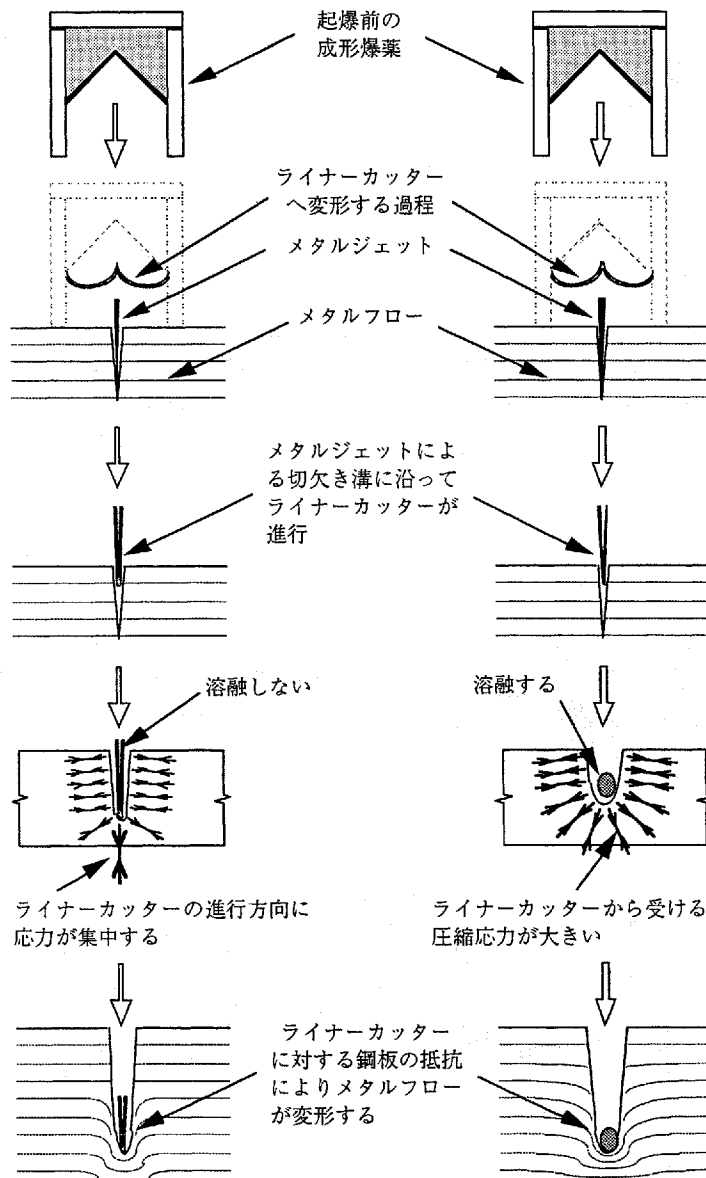
同図から、第一段階として成形爆薬の起爆直後にメタルジェットを生成(図4-6-3参照)し、数千m/sec程度の超音速で鋼板に衝突する。しかし、鋼板の応力伝達速度をはるかに超えているためメタルフローの変形も少なく、抵抗する間もなく切断されるためシャープな切欠き面を形成する。第二段階では、メタルジェットよりも遅れて生成されるライナーカッターは、メタルジェットによって形成された切欠き溝に沿って鋼板内部を進行すると考えられ、ライナー材の材質の違いによるライナーカッター先端の形状に変化が発生し、メタルフローの変形に違いが生じたものと考えられる。

引き続き第3章の3.4.2節で示した図3-4-1~5の切欠き分布図と前節で示した図4-6-2を参考に鋼板の切断メカニズムについて考察したものを図4-6-6に示す。なお、同図ではライナーカッターの挙動を説明するものであるため、メタルジェットによる鋼板の切欠き溝を無視している。

同図中、STEP.1は切断開始点(起点)においてライナーカッターが鋼板に衝突する瞬間を図化したものである。STEP.2~3では、鋼板の起点部を支点としてライナーカッターが回転を起こし、鋼板端部に当たると同時に回転が止まる様子を図化したものである。STEP.4~7では、鋼板の切欠き底部におけるライナーカッターの進行力と鋼板の抵抗力との関係を図化したものである。STEP.8~9では、鋼板の終点部(切断終了点)を支点としてライナーカッターが回転を起こし、ライナーカッターの進行力が弱まる様子を図化したものである。最後にSTEP.10はライナーカッターによる鋼板の切欠き挙動が完了した直後を図化したものである。

これら一連の切断メカニズムは写真4-5-1~4に示すメタルフローの変形過程を説明できており、図3-4-1~5の切欠き分布図で鋼板の起点部および終点部に見られる切欠き深さの浅くなる部分を説明できていることが判断できる。

したがって、鋼板を完全切断する場合においてもライナーカッターの挙動は同様なSTEPを経由しているものと考えられる。



(a) 溶融亜鉛めっき鋼板の場合

(b) 銅板の場合

図4-6-5 ライナー材の材質の違いによる鋼板の切断メカニズム

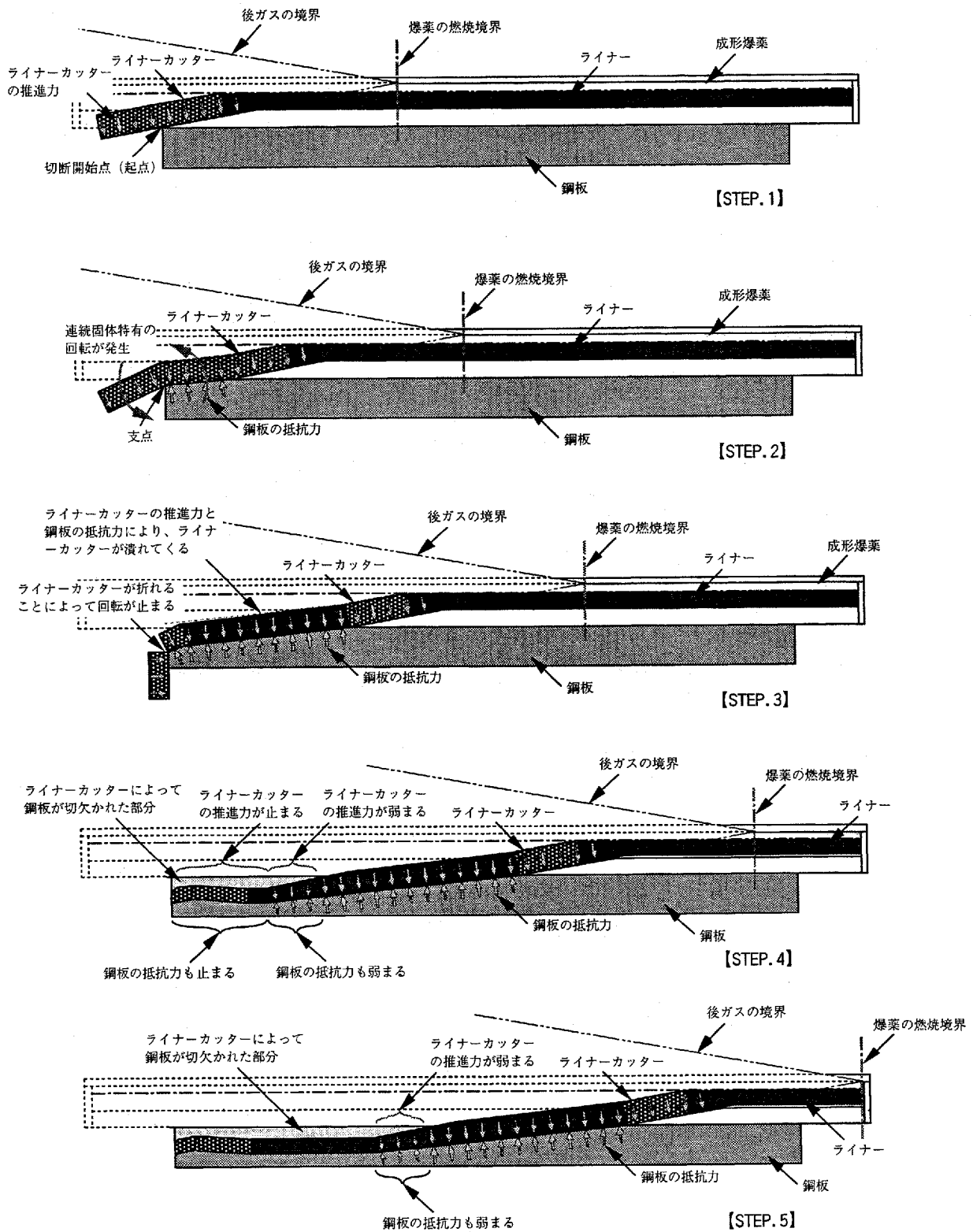


図4-6-6 鋼板の切欠き分布から考察したライナーカッターによる切欠きメカニズム【STEP.1-5】

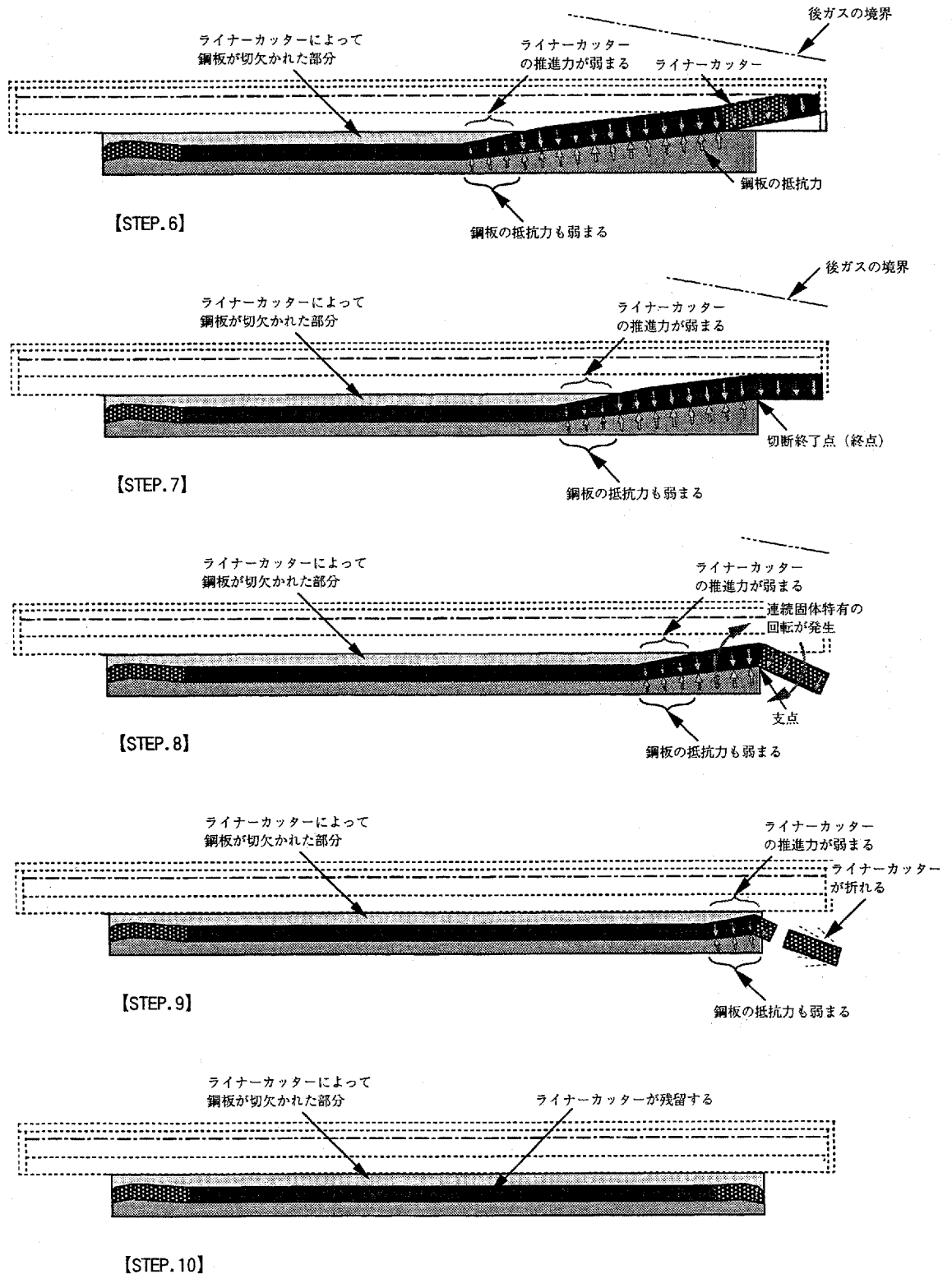


図4-6-6 鋼板の切欠き分布から考察したライナーカッターによる切欠きメカニズム【STEP.6~10】

#### 4.7 まとめ

本章では、成形爆薬による鋼板の衝撃破壊メカニズムを解明するため、高速度カメラによる写真撮影と、実験終了後の鋼板を用いた冶金的分析および顕微鏡によるマクロ組織、ミクロ組織の写真撮影の結果から各破壊現象を考察した。また、モンロー効果で説明されてきた鋼板の切断メカニズムに新たな知見を付加した実験結果に基づく切断メカニズムを提示した。ここで得られた結果を要約すると、以下ようになる。

- ①ペントライトを用いた成形爆薬の爆轟速度は、ライナー材の材質に関係なく7,000m/sec程度の定常爆速が得られる。
- ②成形爆薬を用いた鋼板の衝撃破壊現象は、重力の影響を受けることなく成形爆薬内のライナー材がセットされた方向に対し十分大きな切断効果が得られる。したがって、柱部材用、梁部材用に区別する必要はなく、同じ仕様の成形爆薬を各部材に使用することが可能である。
- ③成形爆薬に用いるライナー材の材質の違いにより、鋼板の残留歪に違いが生じることを確認した。
- ④成形爆薬による鋼板の切断過程において、メタルジェットは鋼板の応力伝達速度を遥かに超えた速度で鋼板に衝突するため、鋼板の抵抗も少なくシャープな切欠き面を形成するとともに、メタルフローもほとんど変形しないと考えられる。  
また、ライナーカッターは、メタルジェットにより形成された切欠き溝に沿って鋼板内部を進行し、ライナー材の材質の違いによってメタルフローの変形の仕方に違いが生じているものと考えられる。

#### 【参考文献】

- 1) 中原正二：火薬学概論、産業図書、昭和62年4月
- 2) (社)火薬学会編：火薬ハンドブック、共立出版、1994.3
- 3) 緒方雄二：発破孔内の爆薬の爆轟性と精密制御発破に関する研究、九州大学学位論文、1997
- 4) 松尾重紀子：衝撃波が誘起する燃焼、計算工学、Vol.2、No.3、pp.164～168、1997
- 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、1978
- 6) 小林茂雄：構造物の発破解体に関する研究、山口大学学位論文、1994
- 7) 高山和喜 編：衝撃波ハンドブック、Springer (シュプリンガー・フェラーク東京)、1995.12
- 8) IRVINE ISRAEL GRASS (高山和喜訳)：Shock Waves & Man (ショックウェイブ)、丸善、1990.10
- 9) 佐藤忠五郎、福山郁生、若園吉一：爆破 [全訂2版]、鹿島出版会、昭和62年3月
- 10) 日本火薬工業会資料編集部：一般火薬学、平成3年4月

## 第5章 H形鋼柱の切断・切除による建物倒壊

### 5.1 まえがき

これまでに、鋼構造建物を対象とした発破解体の学術的な研究は少なく、倒壊方向の制御方法や形鋼を用いた完全切断に関する代表的な研究として文献1), 2)が挙げられる。しかし、この文献では単に水平倒壊、鉛直倒壊の方法を取り上げているものの、敷地条件を考慮した倒壊方向の制御方法については具体的に示されていない。また、成形爆薬により形鋼を完全に切断する方法以外に部分切断や部分切除に関する方法も必要であると考えられる。

そこで本章では、工場建家の発破解体において敷地条件を考慮した倒壊方向の制御方法を提案し、実在の約1/3モデルで細幅系の熱間圧延H形鋼を用いた完全切断と部分切断および部分的に切除する方法を組合せた4種類の発破実験を行い、ヒンジ機構の形成が可能であることを実験的に検証することにした。

### 5.2 鋼構造建物の発破解体パターン

#### 5.2.1 敷地条件による倒壊方向の制御方法

鋼構造建物に対し発破解体を実施する際、対象となる建物周辺の敷地条件を事前に調査し、倒壊方向を決定しなければならない。その倒壊方向を決定する条件として、建物の軒高さ(cH)と周辺建物までの距離(D')との関係が重要となる。そこで、工場建家の発破解体において考えられるラーメンフレームの倒壊方向の制御方法を図5-2-1に示す。なお、cH'はヒンジ間の距離を示している。

同図(a)は、解体建物の敷地条件が片側のみ $D' < cH$ の関係にあり、もう片側は十分なスペースが確保されている場合を示している。この場合は水平方向に倒壊させる制御方法が適していると思われる。水平倒壊させる制御方法は、まず各柱の柱頭および柱脚の2箇所ヒンジ機構を設ける箇所を決定し、事前にワイヤー等のテンション材を対角線上に設置しておきターンバックル等で初期張力を導入する。次にヒンジ機構を設ける箇所に対し、曲げに抵抗できないように成形爆薬で部分切除を行うことにより骨組全体を地上に倒壊させる方法である。

同図(b)は、解体建物の敷地条件が両側ともに $D' < cH$ の関係にある場合を示している。この場合は鉛直方向に倒壊させる制御方法が適していると思われる。鉛直倒壊させる制御方法は、まず各柱の柱頭、柱脚および中央部の3箇所ヒンジ機構を設ける箇所を決定し、事前にワイヤー等のテンション材を柱の中央部で水平に設置しておきターンバックル等で初期張力を導入する。また、水平倒壊を防ぐためのテンション材をX形に設置する。次にヒンジ機構を設ける箇所に対し、曲げに抵抗できないように成形爆薬で部分切除を行うことにより骨組全体を地上に倒壊させる方法である。

なお、柱頭および柱脚のヒンジ位置は、倒壊方向に関係なく全ての柱に対し施工時のクリアランスを確保し、柱頭と柱脚のヒンジ間距離(cH)を保った同一位置に設置するのが良いと思われる。また、鉛直倒壊時における柱中央部のヒンジ位置は、全ての柱に対し柱頭と柱脚の各ヒンジ位置の中央部に設置するのが良いと思われる。

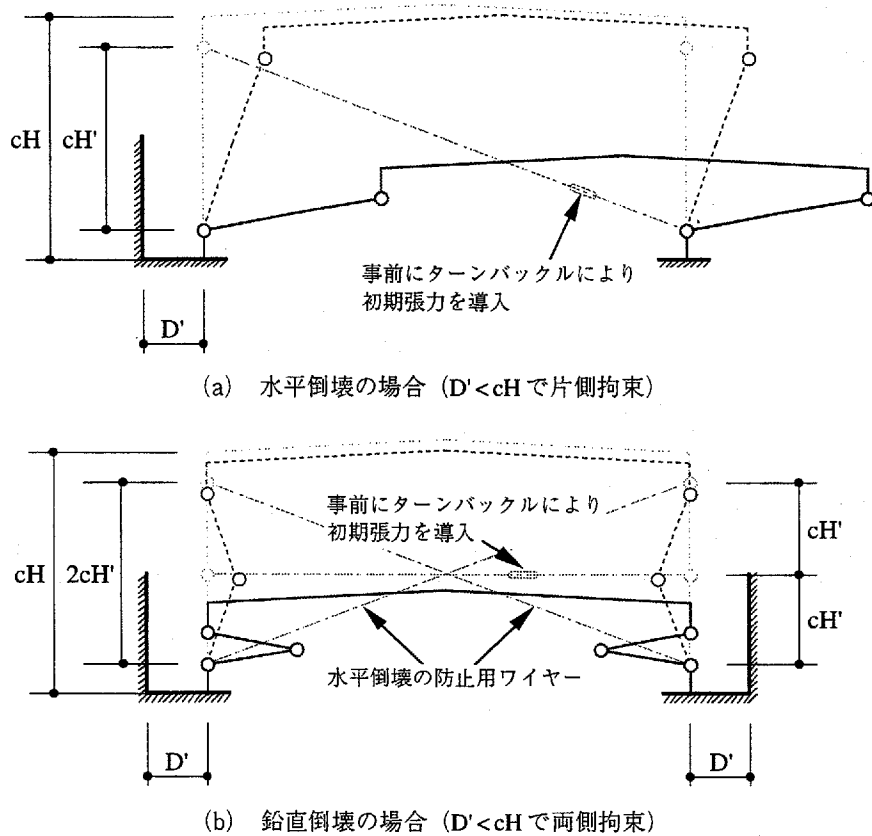


図5-2-1 敷地条件を考慮した発破解体における倒壊方向の制御方法

### 5.2.2 ヒンジ機構の形成パターンおよび組合せ

図5-2-1で示した倒壊方向を制御するヒンジ機構の形成パターンと、その組合せの違いによるH形鋼柱の変形の様子について幾何学的に考察したものが図5-2-2,3である。なお、図5-2-2は水平倒壊時の柱部材に対するヒンジ機構の形成パターンを、図5-2-3は鉛直倒壊時の柱部材に対するヒンジ機構の形成パターンを示している。

各図中、部分切断とは、H形鋼の片側フランジとウェブを完全に切断し、もう片側のフランジを残すことによって曲げに対する抵抗を大幅に低下させる切断方法である。部分切除とは、H形鋼の片側フランジを含むウェブ部分をV字型に切断、切除し、曲げに対する抵抗を大幅に低下させる方法(以降、Vカットと記す)である。また、 $crH'$  は各ヒンジ間の部材の回転半径を示している。

図5-2-2では、(a):部分切断のみと(b):部分切断とVカットの組合せの2種類を示している。しかし、(a)の場合は $crH' > cH'$ となっており、実際には変形が起りにくいと思われる。したがって、水平倒壊させる場合には(b)に示す部分切断とVカットの組合せが適しているものと考えられる。

図5-2-3では、(a):部分切断のみと(b):2箇所の部分切断とVカットの組合せ、および(c):部分切断と2箇所のVカットの組合せを示している。(a)の場合は図6-2-2と同様に $crH' > cH'$ となっており、実際には変形が起りにくいと思われる。また、(b)の場合は $crH' = cH'$ となっており、実際には変形が起るものの、中央部が接触(メタルタッチ)することにより倒壊しにくいと思われる。したがって、鉛直倒壊させる場合には(c)に示す部分切断と2箇所のVカットの組合せが適しているものと考えられる。



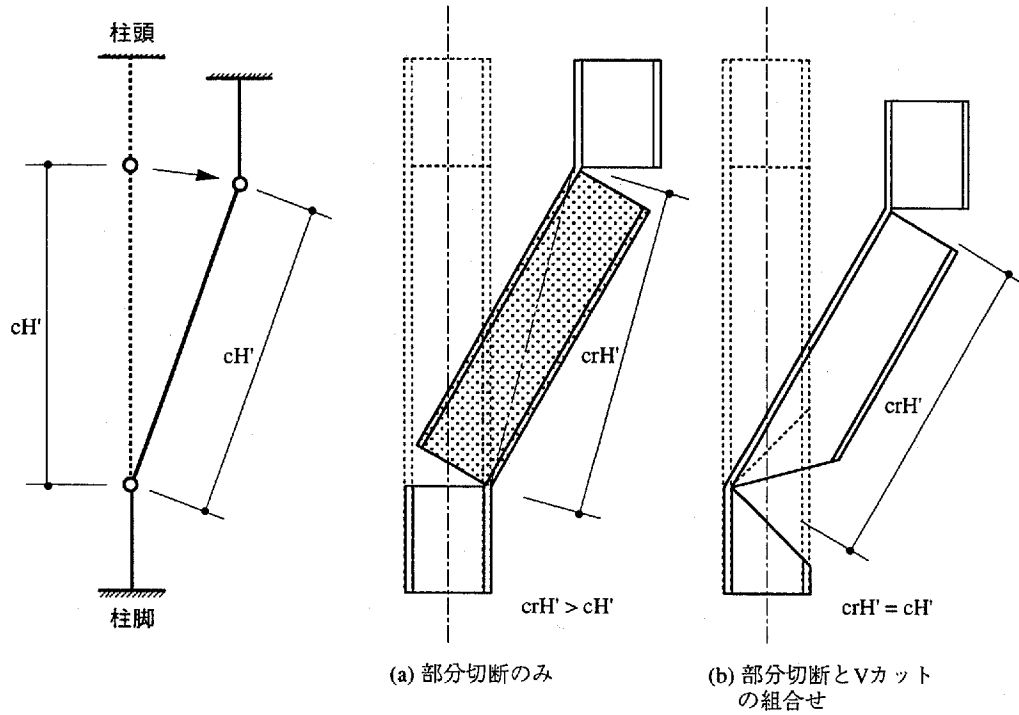


図5-2-2 水平倒壊時の柱部材に対するヒンジ機構の形成パターン

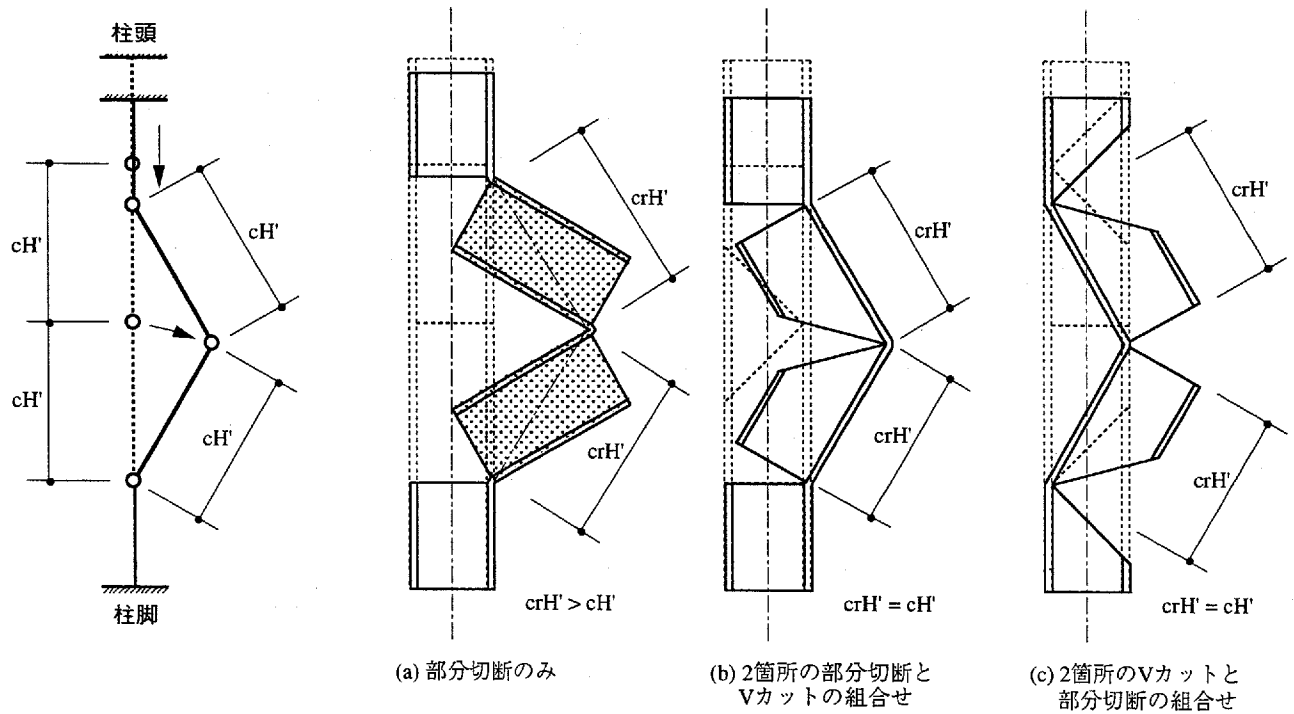


図5-2-3 鉛直倒壊時の柱部材に対するヒンジ機構の形成パターン

### 5.3 成形爆薬によるH形鋼の切断・切除に関する実験計画

#### 5.3.1 発破解体用建物の概要

本節では、実験に用いるH形鋼の断面形状を選定するために、図5-3-1～2に示す1層の工場または倉庫建家を想定した試設計を行った。なお、各部位の断面形状を表5-3-1に示す。

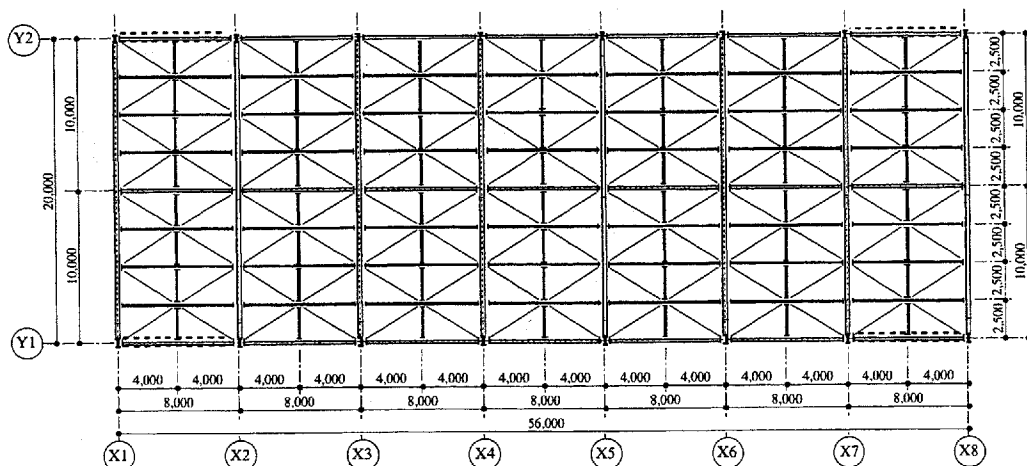
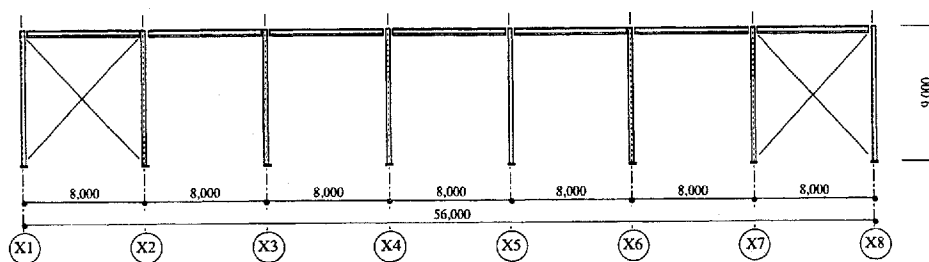
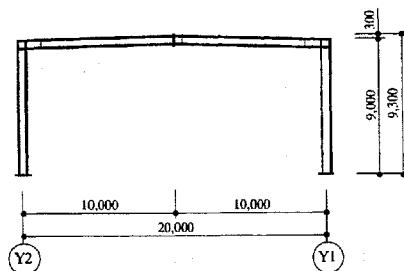


図5-3-1 発破解体用建物の梁伏図



桁行方向 (Y1, Y2通り)



張間方向 (X1～X8通り)

図5-3-2 発破解体用建物の軸組図

表5-3-1 発破解体用建物の断面リスト

部 位	断 面 形 状	
柱	H-588×300×12×20 (SS400鋼材)	
大梁	張間方向	H-588×300×12×20 (SS400鋼材)
	桁行方向	H-400×200×8×13 (SS400鋼材)
小梁	張間方向	H-200×100×5.5×8 (SS400鋼材)
	桁行方向	H-400×200×8×13 (SS400鋼材)
ブレース	2L-65×65×6 (SS400鋼材)	
継ぎ梁	H-125×60×6×8 (SS400鋼材)	
水平ブレース	10φ [ターンバックル付] (SS400鋼材)	

5.3.2 H形鋼の選定および実験パラメータ

本実験で用いるH形鋼は、前節の試設計で得られた柱部材を基準に、フランジ幅( $B_f$ )とウェブ丈( $H_w$ )の比が $B_f/H_w=0.5$ となるような中幅系の熱間圧延H形鋼で実大の約1/3モデルに相当するものを検討した。しかし、このサイズに該当するH形鋼が存在しないため、 $B_f/H_w=0.5$ で細幅系に属するH-200×100×5.5×8のSS400鋼材を使用することにした。H形鋼のフランジ部およびウェブ部の機械的特性と化学成分を表5-3-2,3に示す。

本実験のパラメータは、

- ①ライナー材の材質の違い：溶融亜鉛めっき鋼板と銅板の2種類
- ②H形鋼の切断、切除方法の違い：完全切断タイプが2種類、部分切断タイプが1種類、部分切除タイプが1種類の計4種類 (5.3.3節参照)

を設定し組合せた。

なお、各ライナー材の機械的性質および化学成分は表5-3-2,3に示している。また、各パラメータの組合せは、後の表5-3-4に示している。

表5-3-2 H形鋼およびライナー材の機械的性質

種類	板厚 (mm)	$\sigma_y$		$\sigma_u$		YR (%)	EL (%)	HRB
		(t/cm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(t/cm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )			
H形鋼 [フランジ] (SS400)	8	3.19	313	4.45	436	71.7	42	94
H形鋼 [ウェブ] (SS400)	5.5	3.79	371	4.72	463	80.3	32	100
溶融亜鉛めっき鋼板 (SGCC)	0.8	2.61 <sup>*1</sup>	256 <sup>*1</sup>	3.66	359	71.3	36	77
銅板 (C1201P-1/4H)	0.8	1.76 <sup>*1</sup>	172 <sup>*1</sup>	2.44	239	72.4	38	54

$\sigma_y$ ：降伏応力， $\sigma_u$ ：引張強度，YR：降伏比，EL：伸び，  
HRB：ロックウェル硬さ(Bスケール)，\*1：0.2%オフセット法による

表5-3-3 H形鋼およびライナー材の化学成分

種類	C	Si	Mn	P	S	Cu	Zn目付量 (両面) (g/m <sup>2</sup> )
	×100 (%)			×1000 (%)		(%)	
SS400 <sup>*2</sup>	9	18	61	24	18	—	—
SGCC <sup>*3</sup>	2	2	24	19	14	—	244
C1201P-1/4H <sup>*3</sup>	—	—	—	20	—	99.98	—

\*2：ミルシート値，\*3：化学成分の分析値

### 5.3.3 H形鋼の事前処理方法と切り取り寸法

本実験では、成形爆薬によるH形鋼の完全切断\*1、部分切断および部分切除を行うため、発破解体の実施と同様にH形鋼のウェブの一部を事前に切り取る処理(以降、事前処理と記す)を行った。なお、実施での事前処理はガスにより切り取る方法を採用するが、本実験では試験体に熱影響を余り与えないようにするため、レーザーにより切り取る方法を採用した。この事前処理後の試験体の概要を図5-3-3(a)～(d)に示しており、各試験体に示す点線は成形爆薬により切断する箇所である。

同図(a)に示すタイプAはH形鋼を完全に分離させるため、フランジ2箇所とウェブを斜め45°に切断する完全切断を想定した試験体である。同図(b)に示すタイプBはH形鋼を完全に分離させるため、フランジ2箇所とウェブを同一直線上に切断する完全切断を想定した試験体である。同図(c)に示すタイプCはH形鋼にヒンジ機構を形成させるため、フランジ1箇所とウェブを同一直線上に切断する部分切断を想定した試験体である。同図(d)に示すタイプDは、H形鋼にヒンジ機構を形成させるために片側フランジの2箇所とウェブの2箇所をV字型(90°)に切断、切除する部分切除を想定した試験体である。なお、試験体の長さは、タイプAでは斜め45°の完全切断を考慮してウェブ丈の2倍とし、タイプB～タイプCもこの長さに統一した。また、タイプDではV字型(90°)に切断、切除することを考慮してウェブ丈の3倍に設定した。

事前処理によるH形鋼の断面欠損部は、事前処理後の有効断面に対し長期の圧縮応力( $L\sigma_c$ )と曲げ応力( $L\sigma_b$ )に十分耐えられるよう、6.3.1節の試設計に基づき次の条件を設定した。

#### 【各試験体に共通な前提条件】

- ①：試設計時の柱の有効長さは9mであるため、試験体の柱の有効長さは3m(約1/3モデル)で検討する。
- ②：各試験体の事前処理を施す箇所は、ウェブフィレットから丈方向に5mm(フランジ端から13mm)のウェブ部とする。
- ③：各試験体の事前処理の大きさは、タイプAおよびDの場合は80mm×70mm、タイプBおよびCの場合は40mm×35mmとし、各H形鋼の断面欠損率がほぼ同じとなるように設定する。
- ④：柱の設計用長期軸力( $LN$ )は試設計時を参考に、降伏軸力( $LN_y$ )の10%( $LN=0.1L N_y$ )とする。また、長期の曲げに対する断面検討は試設計時の長期曲げ応力( $L\sigma_b$ )と長期許容曲げ応力( $Lf_b$ )の比： $L\sigma_b/Lf_b=0.7$ を採用する。  
なお、設計基準強度( $F_s$ )はSS400鋼材の $F_s=2.4\text{ t/cm}^2$ である。

#### 【タイプAおよびDの断面検討】

H-200×100×5.5×8の実断面積( $A_r=27.16\text{ cm}^2$ )に対し、事前処理後の有効断面積( $A_{e1}$ )および断面欠損率( $A_{e1}/A_r$ )は、

$$A_{e1}=23.24\text{ cm}^2, \quad A_{e1}/A_r=0.144 \quad (14.4\%)$$

となる。

設計用長期軸力( $LN$ )は、前提条件④より次の値となる。

$$LN=0.1LN_y=0.1 \cdot A_r \cdot F_s=4.35\text{ ton}$$

よって、長期の圧縮応力( $L\sigma_{c1}$ )は次の値となる。

$$L\sigma_{c1}=LN/A_{e1}=0.19\text{ t/cm}^2$$

長期の許容圧縮応力( $Lf_c$ )は、 $Lf_c=0.71\text{ t/cm}^2$ (細長比： $\lambda=116$ )であるため、長期の圧縮と曲げ(前提条件④)の組合せを検討すると、

$$L\sigma_{c1}/Lf_c+L\sigma_b/Lf_b=0.27+0.7=0.97 < 1.0$$

となり、事前処理後の柱断面は長期荷重下に対し十分耐えられることが確認できる。

\*1 連棟の建物で解体工事を工区分けしたい場合や、多スパンの骨組みで初期段階の倒壊方向を制御する場合等に採用する。

【タイプBおよびCの断面検討】

タイプA, Dと同様に、事前処理後の有効断面積(Ae2)および断面欠損率(Ae2/Ar)は、

$$Ae2=23.17\text{ cm}^2, \quad Ae2/Ar=0.147\text{ (14.7\%)}$$

となる。また、長期の圧縮応力(Lσc2)は次の値となる。

$$L\sigma c2=LN/Ae2=0.19\text{ t/cm}^2$$

よって、長期の圧縮と曲げ(前提条件④)の組合せを検討すると、

$$L\sigma c2/Lfc+L\sigma B/LfB=0.27+0.7=0.97<1.0$$

となり、事前処理後の柱断面は長期荷重下に対し十分耐えられることが確認できる。

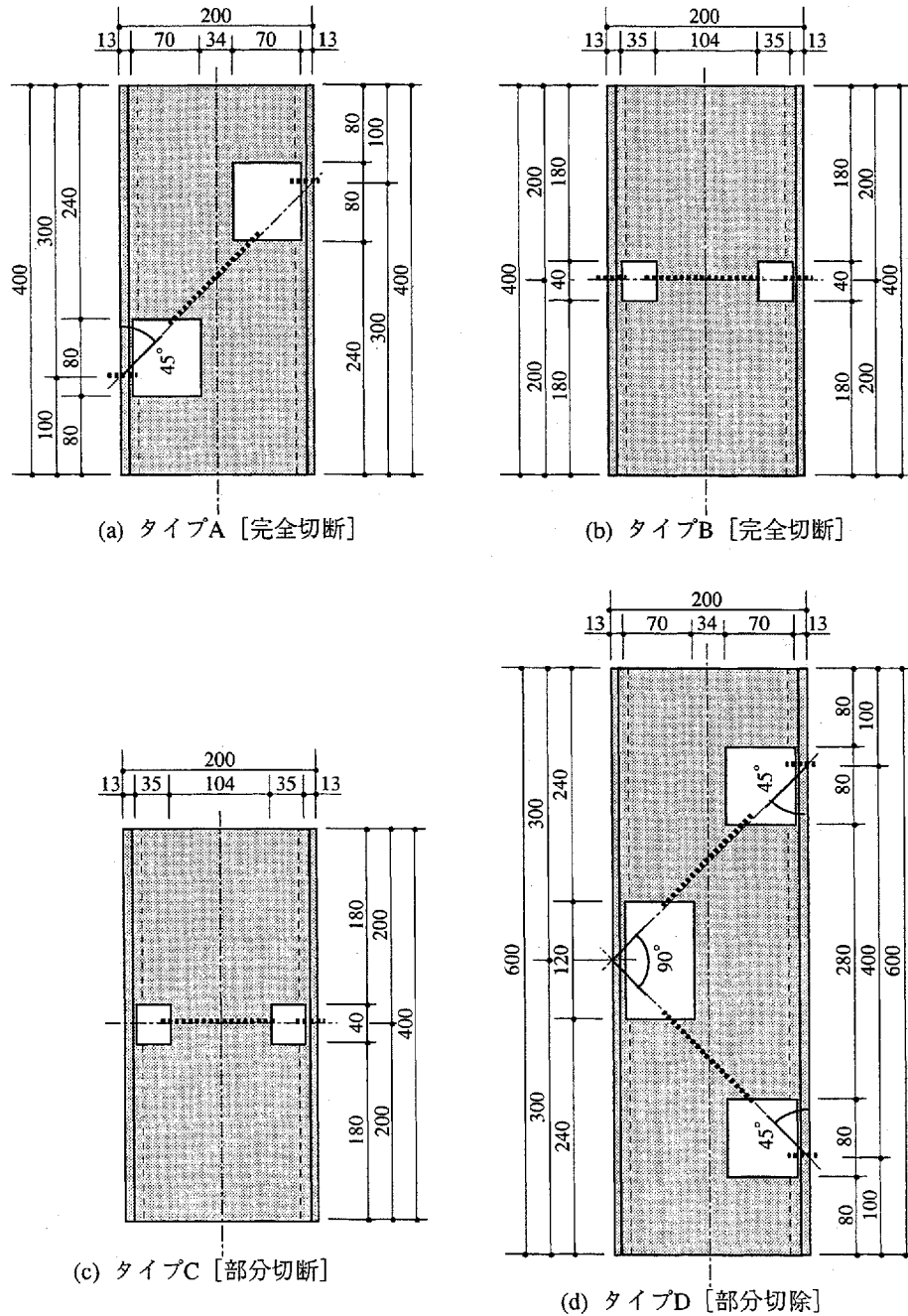


図5-3-3 事前処理を施した試験体の概要 (H形鋼柱)

### 5.3.4 実験で用いる成形爆薬の形状と爆薬量

本実験で用いる成形爆薬の形状は、第3章で得られた実験結果を参考に鋼板の切断効果が大いに期待できる形状として、図2-6-1に示す形状係数を $\kappa=0.70\sim 0.90$ に、ライナー角を $\alpha=90^\circ$ に設定することにした。また、成形爆薬の爆薬長は、H形鋼のフランジとウェブに共通となるよう150mmに設定した。各タイプにおける成形爆薬の設置状況を図5-3-4に示す。

本実験では、高速度カメラによるH形鋼の切断挙動を撮影することを目的としているため、成形爆薬の爆薬量(以降、薬量と記す)は必要最小限にしなければならない。そこで、第3章と同様に以下に示すSS400鋼材の実績値を利用することにした。

発破係数 :  $C_e=1.674$  (g/cm<sup>2</sup>)

爆薬充填密度 :  $\rho_e=1.568$  (g/cm<sup>3</sup>)

これらの値を利用し、H形鋼のフランジ板厚(8mm)およびウェブフィレットの一部(5mm)を加えた13mmの板厚を完全に切断する場合の薬量を式(3.2.3)で算出すると、以下のようを求めることができる。なお、鋼構造建物の発破解体の実施を考慮して、ウェブ切断用の成形爆薬もフランジ切断用の成形爆薬(切断板厚:13mm)と同じ薬量とした。

#### 【成形爆薬の薬量の計算】

H形鋼のフランジの有効幅は100mmであることから、H形鋼のフランジ板厚(8mm)およびウェブフィレットの一部(5mm)を加えた13mmの切断面積( $A_{(13)}$ )を用いて薬量( $W_{sc(13)}$ )を算出すると、以下のようになる。

$$W_{sc(13)}' = C_e \cdot A_{(13)} = 21.76 \text{ (g)} \quad \dots\dots\dots (5.3.1)$$

この薬量に対し、 $\rho_e$ と $\kappa=0.75$ (想定)から爆薬幅( $W_{(13)}$ )と爆薬高さ( $H_{(13)}$ )を求め、爆薬ケースの製作可能な範囲にまとめると、以下のようになる。

$$W_{(13)} = 16.66 \rightarrow 17 \text{ (mm)}, \quad H_{(13)} = 12.50 \rightarrow 13 \text{ (mm)} \quad \dots\dots\dots (5.3.2)$$

実際に使用する爆薬長は150mmであることから、この爆薬長、 $\rho_e$ と $\kappa=0.76$ ( $H_{(13)}/W_{(13)}$ )、および式(5.3.2)の値から、本実験で使用する成形爆薬の薬量( $W_{sc(13)}$ )は、以下のようになる。

$$W_{sc(13)} = 34.99 \rightarrow 35 \text{ (g)} \quad \dots\dots\dots (5.3.3)$$

なお、試験体の組合せを表5-3-4に、試験体名称の説明を図5-3-5に示す。

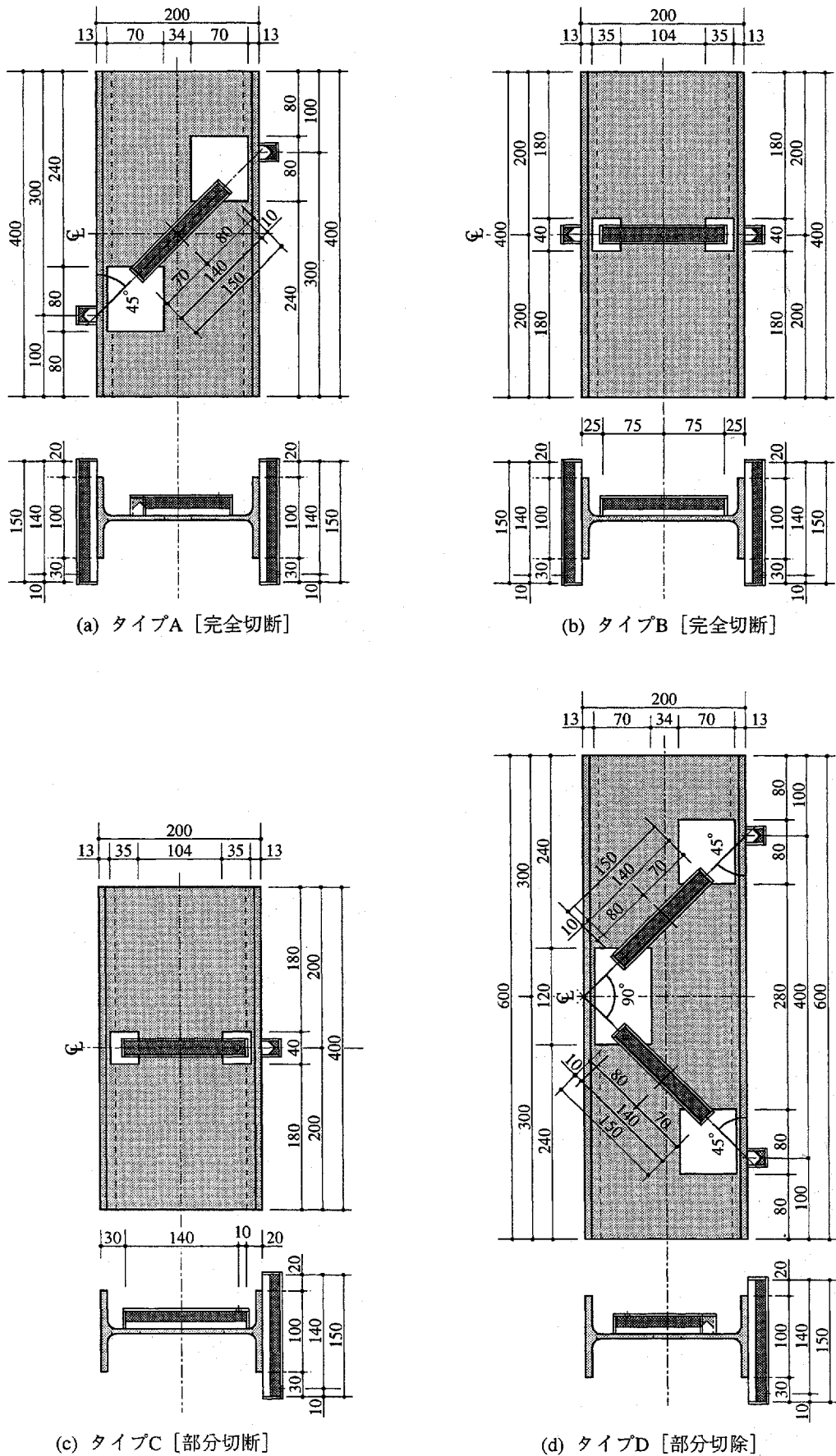


図5-3-4 各タイプにおける成形爆薬の設置状況 (H形鋼柱)

表5-3-4 実験パラメータおよび試験体の組合せ

試験体名称	ライナー材	事前処理	実験方法
SHN200-COD4-Z08K076S09	溶融亜鉛めっき鋼板 T=0.8mm	タイプA	完全切断
SHN200-COD2-Z08K076S09		タイプB	
SHN200-CRD2-Z08K076S09		タイプC	部分切断
SHN200-CRD4-Z08K076S09		タイプD	部分切除
SHN200-COD4-C08K076S09	銅板 T=0.8mm	タイプA	完全切断
SHN200-COD2-C08K076S09		タイプB	
SHN200-CRD2-C08K076S09		タイプC	部分切断
SHN200-CRD4-C08K076S09		タイプD	部分切除

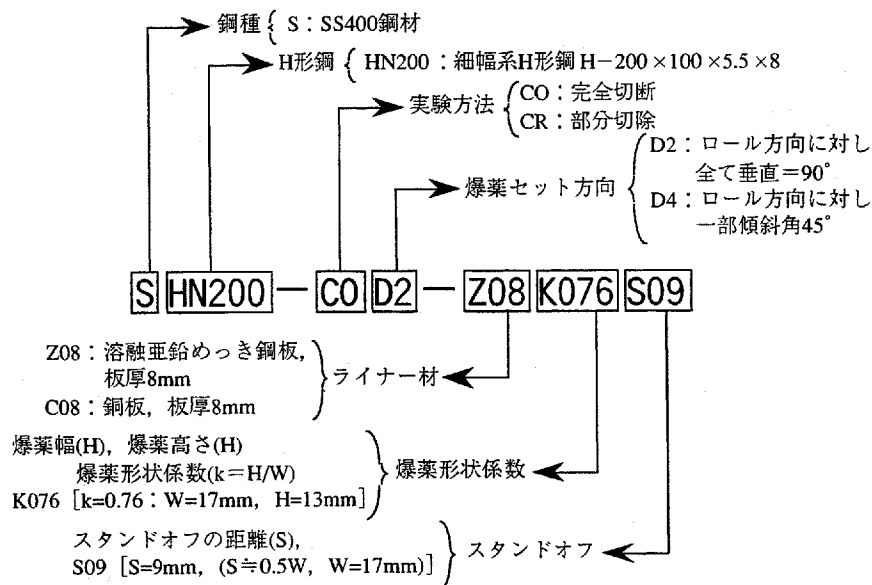


図5-3-5 試験体名称の説明

### 5.3.5 実験方法

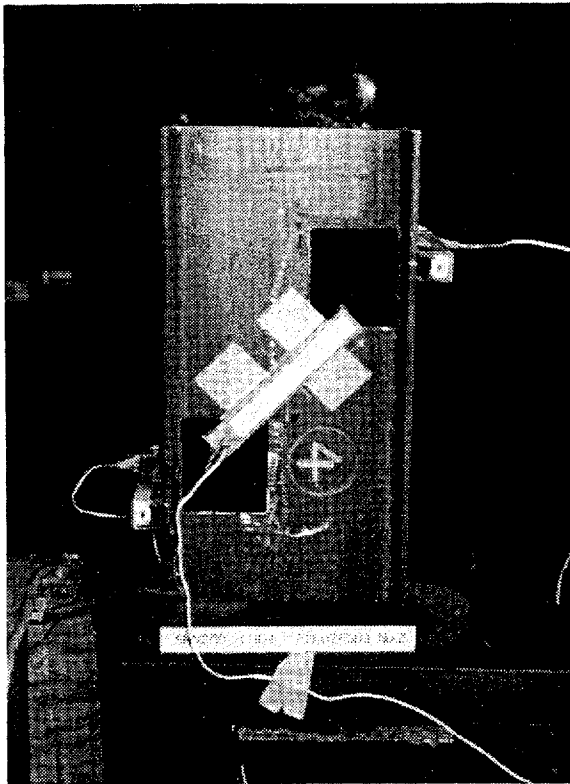
本実験は、通商産業省工業技術院資源環境技術総合研究所内の爆発ドーム(茨城県つくば市)で発破実験を行った。なお、音速よりもはるかに速いH形鋼の切断現象についても高速度カメラを用いて撮影した。

この写真撮影で使用した高速度カメラは、CORDIN社製のフレミングカメラ124(フレーム速度: 100,000~2,500,000FPS(Frame/sec)を使用し、フレーム速度は500,000FPS(コマ間隔=2μsec)に設定した。この高速度カメラの系統については、第5章の5.2.3, 5.2.4節で詳細に述べている。

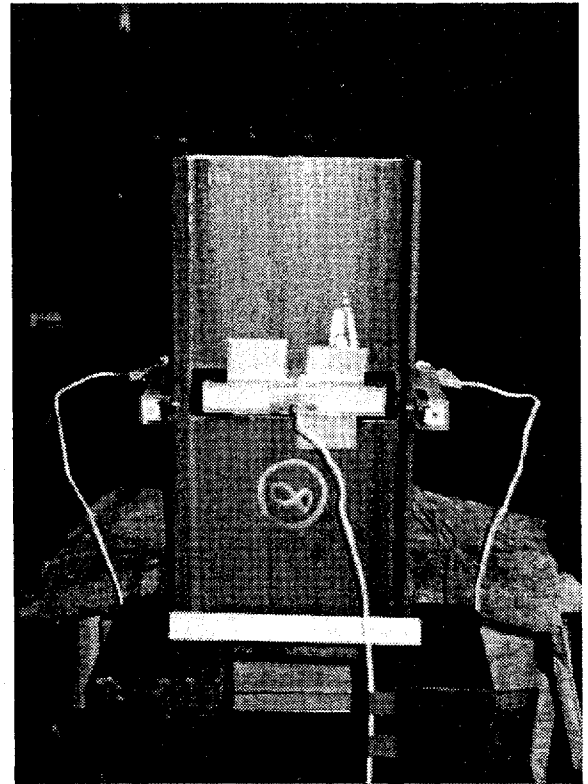
本実験で使用した成形爆薬は、図2-6-1(pp.13)に示すような無色透明の亚克力樹脂板で製作した爆薬ケースに、ペントライトを80℃近くで溶解し、溶融充填したものを精密電気雷管により起爆した。なお、成形爆薬の設置方法はテープで簡単に止める程度とし、接着剤等は用いなかった。

この起爆直前の成形爆薬とH形鋼の設置状況を写真5-3-1(a)~(d)に示す。

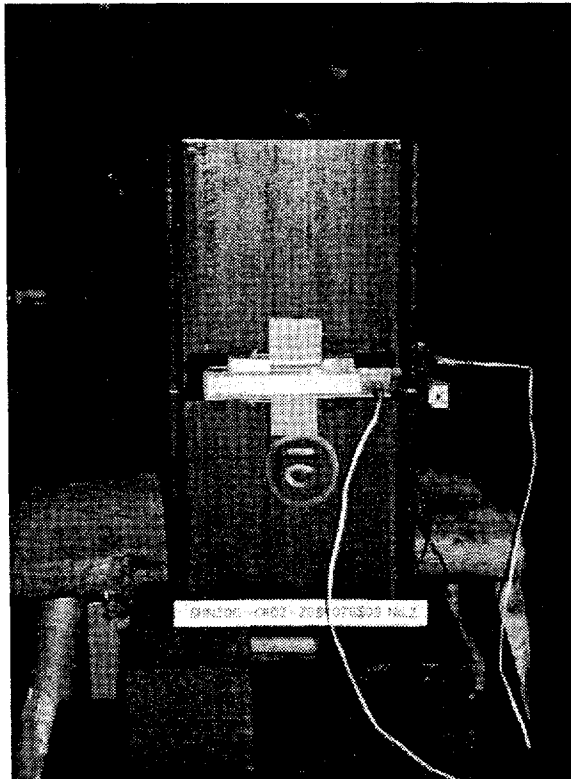




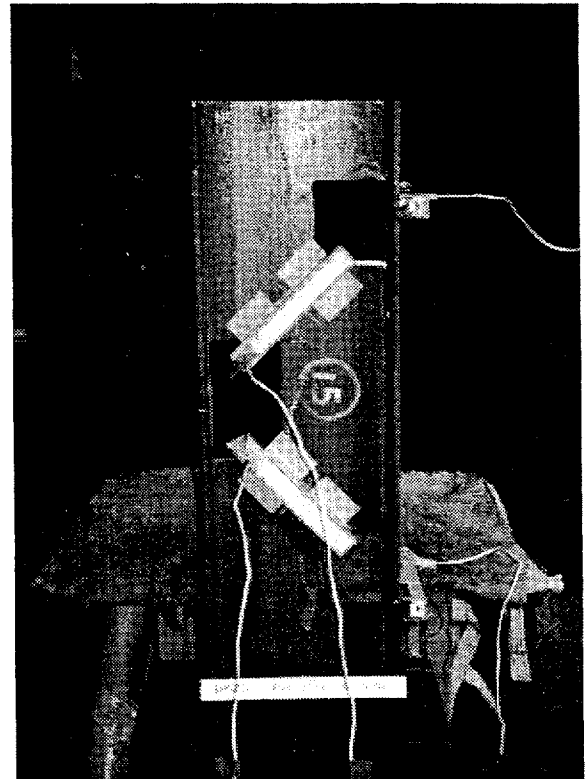
(a) タイプA [完全切断]  
(SHN200-COD4-C08K076S09 試験体)



(b) タイプB [完全切断]  
(SHN200-COD2-C08K076S09 試験体)



(c) タイプC [部分切断]  
(SHN200-CRD2-Z08K076S09 試験体)



(d) タイプD [部分切除]  
(SHN200-CRD4-Z08K076S09 試験体)

写真5-3-1 各タイプにおける起爆直前の成形爆薬とH形鋼の設置状況

## 5.4 成形爆薬によるH形鋼の切断・切除に関する実験結果と考察

### 5.4.1 実験結果およびライナー材の材質の違いによるH形鋼の切断状況

本研究で実施した各タイプにおける実験終了後のH形鋼の切断、切除状況を写真5-4-1(a)～(d)に示す。同写真の(a)は、斜め45°に完全切断したタイプAの実験結果を、同写真の(b)は、水平に完全切断したタイプBの実験結果を、同写真の(c)は、ヒンジ機構を形成させるために片側フランジとウェブを切断した部分切断タイプのタイプCの実験結果を、同写真の(d)は、ヒンジ機構を形成させるために片側フランジとウェブをV字型に切断、切除した部分切除タイプのタイプDの実験結果を示している。

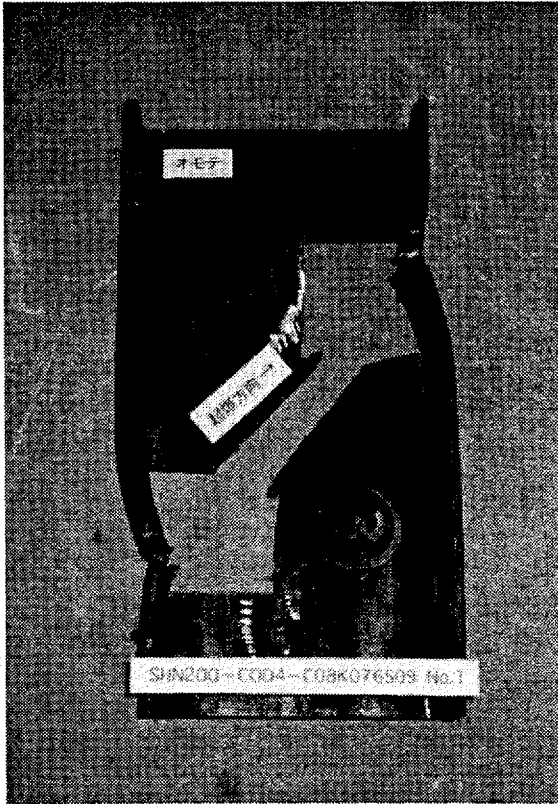
同写真から、各タイプの試験体において図5-3-4に示した実験計画通りの切断、切除の制御ができていたことが確認できる。特に、タイプDでは図5-2-3(c)に示したVカットのヒンジ部の回転通り、折り曲げる方向にくの字に変形していることから、実施においても成形爆薬によってヒンジ機構を形成させる制御方法として十分適用可能であると考えられる。

写真5-4-2～3は、タイプBの完全に切断した場合でライナー材の材質の違いによるH形鋼フランジの切断状況を、写真5-4-4～5は、タイプCの部分切断した場合でライナー材の材質の違いによるH形鋼ウェブの切断状況を示している。

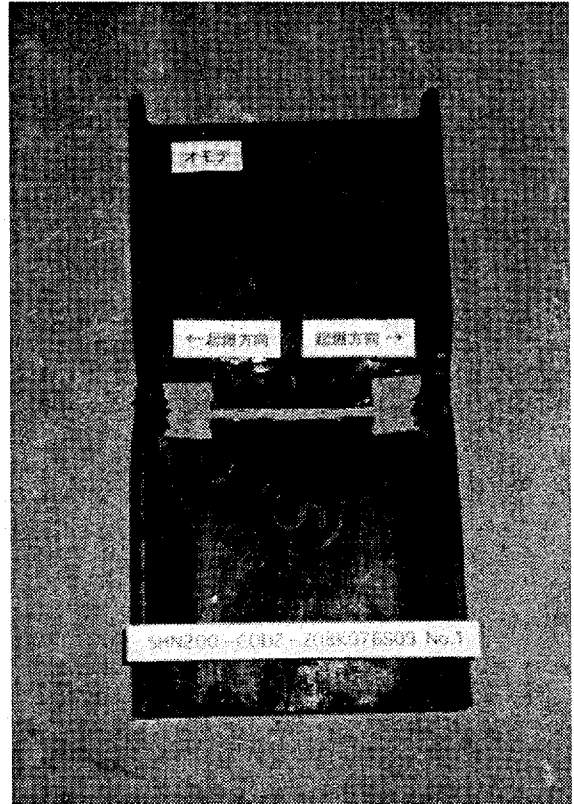
写真5-4-2と写真5-4-3を比較すると、ライナー材に銅板を用いた場合のH形鋼フランジの切断近傍の変形は溶融亜鉛めっき鋼板を用いた場合よりも大きく変形していることが確認できる。また、フランジの切断面を比較しても、銅板を用いた方が若干ねじれるような変形をしており、ウェブが反り返る変形も大きいことが確認できる。これは、ライナーカッターが鋼板内部を進行する過程において銅板は溶融し、ライナーカッター先端の接触面が大きくなる傾向にある(第4章の図4-6-5参照)ことから、このような違いが生じたものと考えられる。

写真5-4-4と写真5-4-5を比較すると、上述と同様に、ライナー材に銅板を用いた場合のH形鋼フランジの切断近傍の変形は溶融亜鉛めっき鋼板を用いた場合よりも大きく変形していることが確認できる。また、ウェブが反り返る変形も大きいことが確認できる。

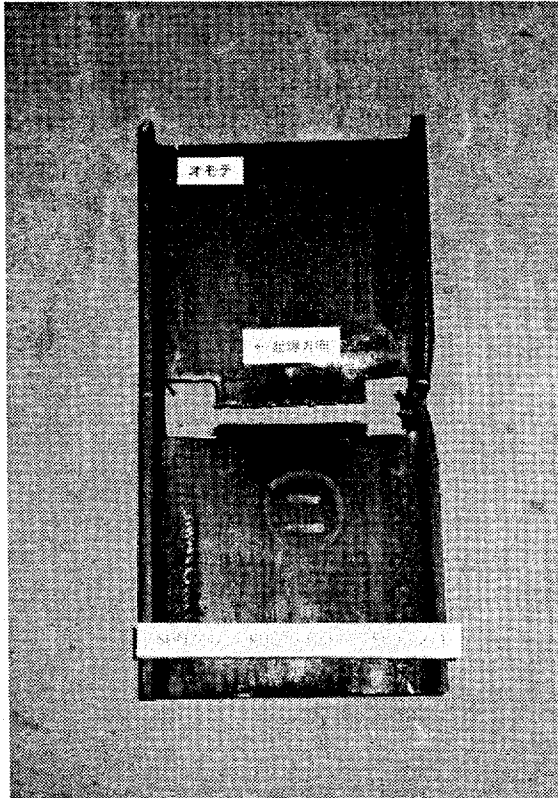
なお、ライナー材の材質に関係なく、成形爆薬をセットしなかったフランジの裏側には、もう片方のフランジを貫通したライナーカッターが衝突しているものの大きな変形はしておらず、平行な状態を保つ傾向にある。この現象は、成形爆薬の薬量はフランジ板厚(8mm)とウェブフィレットの一部(5mm)を加えた計13mmの板厚で決定していることから、ライナーカッターがフランジを貫通した時点でエネルギーを消費し、もう片方のフランジに変形を起こさせる程の余力がなかったものと考えられる。



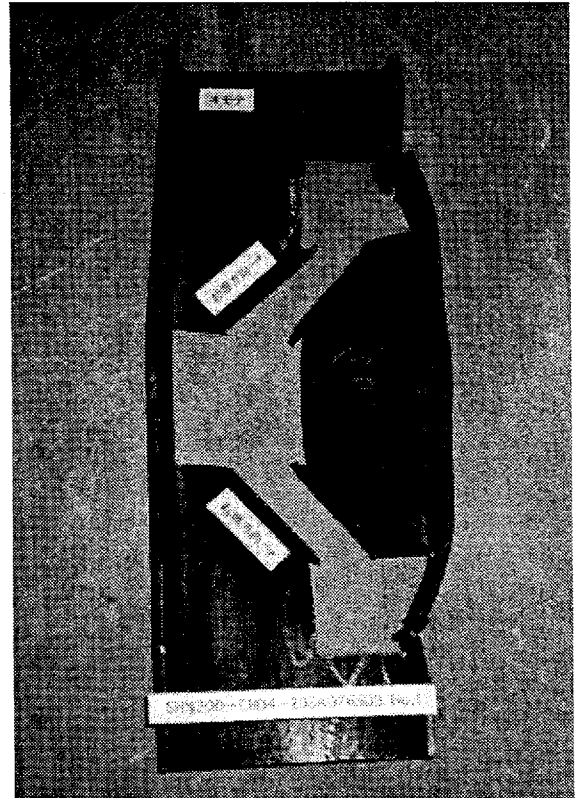
(a) タイプA [完全切断]  
(SHN200-COD4-C08K076S09 試験体)



(b) タイプB [完全切断]  
(SHN200-COD2-Z08K076S09 試験体)

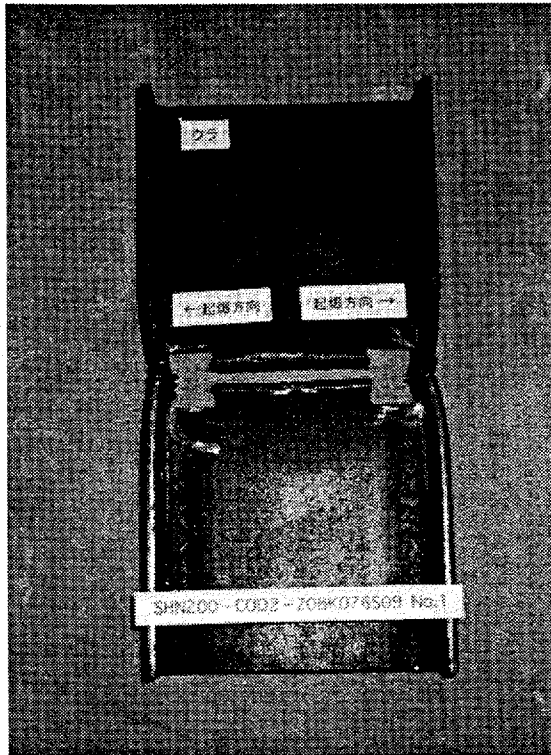


(c) タイプC [部分切断]  
(SHN200-CRD2-C08K076S09 試験体)



(d) タイプD [部分切除]  
(SHN200-CRD4-Z08K076S09 試験体)

写真 5-4-1 各タイプにおける実験終了後のH形鋼の切断、切除状況

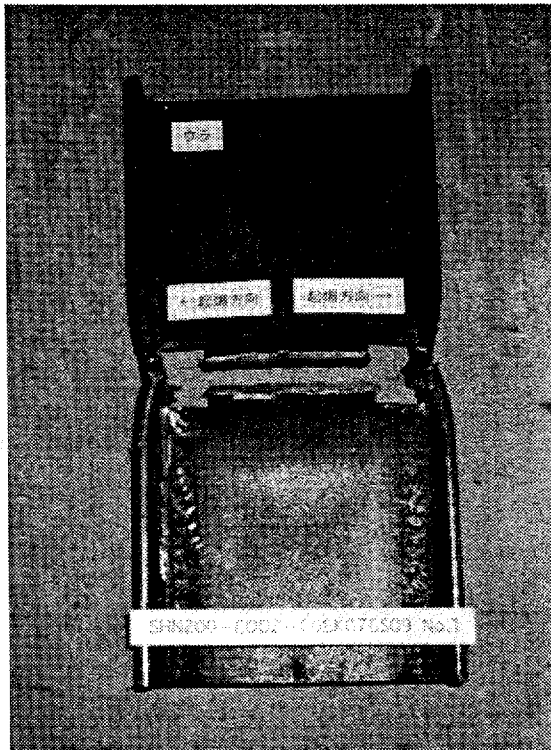


(a) タイプB [完全切断]の裏側

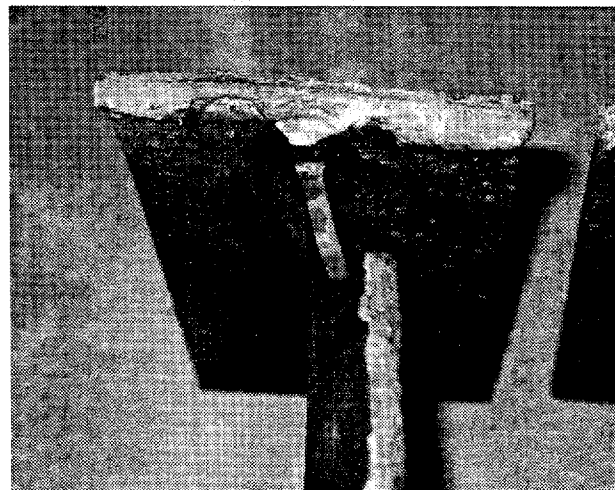


(b) タイプB [完全切断]のフランジ切断面

写真5-4-2 タイプBにおけるH形鋼フランジの切断状況 [溶融亜鉛めっき鋼板の場合]  
(SHN200-COD2-Z08K076S09 試験体)

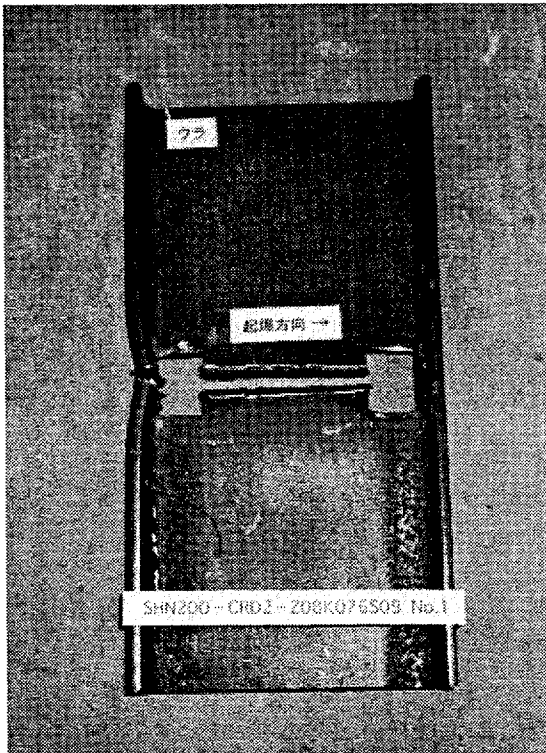


(a) タイプB [完全切断]の裏側

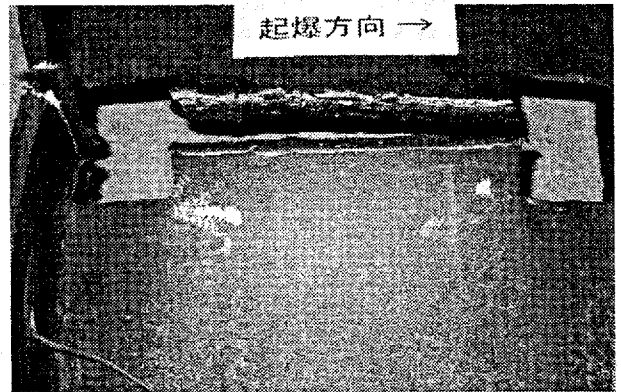


(b) タイプB [完全切断]のフランジ切断面

写真5-4-3 タイプBにおけるH形鋼フランジの切断状況 [銅板の場合]  
(SHN200-COD2-C08K076S09 試験体)

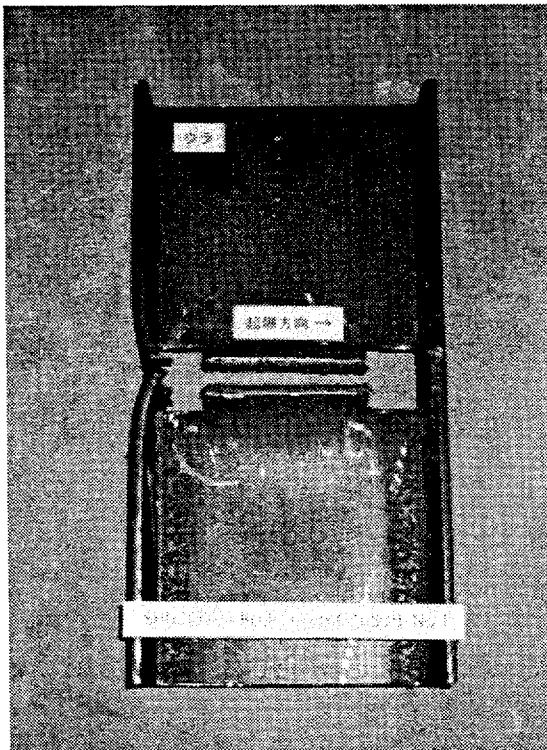


(a) タイプC [部分切断]の裏側

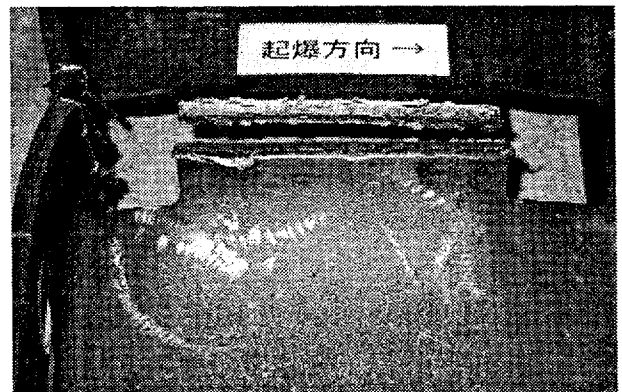


(b) タイプC [部分切断]のウェブ切断面

写真5-4-4 タイプCにおけるH形鋼ウェブの切断状況 [溶融亜鉛めっき鋼板の場合]  
(SHN200-CRD2-Z08K076S09 試験体)



(a) タイプC [部分切断]の裏側



(b) タイプC [部分切断]のウェブ切断面

写真5-4-5 タイプCにおけるH形鋼ウェブの切断状況 [銅板の場合]  
(SHN200-CRD2-C08K076S09 試験体)



#### 5.4.2 高速度カメラによる写真撮影結果

本節では、高速度カメラを用いてH形鋼の切断現象を $2\mu\text{sec}$ 毎に写真撮影を行った。その撮影結果を写真5-4-6に示す。同写真は起爆から $10\mu\text{sec}$ 後に撮影を開始し、以降 $56\mu\text{sec}$ 後まで $2\mu\text{sec}$ 毎にSHN200-COD2-C08K076S09試験体を正面から撮影した結果である。

同写真から、起爆から $12\mu\text{sec}$ 後に成形爆薬が爆轟を開始していることが確認できる。

ウェブに設置した成形爆薬から、爆薬長 $150\text{mm}$ の中央で起爆を行い、 $12\mu\text{sec}$ 後から $22\mu\text{sec}$ 後までの $10\mu\text{sec}$ が爆轟している時間であることが確認できる。この結果から、ウェブに設置した成形爆薬の爆轟速度は平均 $7,500\text{m/sec}$ となる。

同様に、両フランジに設置した成形爆薬から、爆薬長 $150\text{mm}$ の端部から $10\text{mm}$ の位置で起爆を行い、 $12\mu\text{sec}$ 後から $30\mu\text{sec}$ 後までの $18\mu\text{sec}$ が爆轟している時間であり、ほぼ同時である(図5-4-1参照)ことが確認できる。この結果から、両フランジに設置した成形爆薬の爆轟速度は平均 $7,777\text{m/sec}$ となる。

ウェブに設置した成形爆薬の爆轟状態を観察すると、精密電気雷管を設置した箇所は成形爆薬の燃焼にともなう後ガスの膨張が見られず、 $32\mu\text{sec}$ までは雷管を設置した点を中心に円状の黒い影が広がる現象が表れている。これは、成形爆薬の燃焼にともなう後ガスの膨張は発生しているものの、雷管の起爆にともなう衝撃波の伝播により後ガスが押される状態になっているものと考えられる。また、 $32\mu\text{sec}$ 以降の黒い影はだ円形状に広がる現象に変わる傾向にある。これは、両側のフランジに取り付けた成形爆薬のメタルジェットや衝撃波が、起爆方向に膨張しようとするウェブに設置した成形爆薬の後ガスを逆方向に押す形となり、雷管の起爆にともなう衝撃波の伝播を妨げる状態になっているものと考えられる。

全ての写真を通して、成形爆薬の設置位置やH形鋼の位置がほとんど移動していないことが確認できる。また、 $56\mu\text{sec}$ 後では、フランジおよびウェブの断面の一部は切り欠かれているか一部ライナーカッターが貫通しているものと思われる。

したがって、音速をはるかに超える超音速状態でのH形鋼の切断過程では部材の移動は起こらず、成形爆薬を設置した位置のみに切断効果を発揮しているものと考えられる。また、鋼構造物の発破解体時においても同様な現象が起こっているものと考えられ、成形爆薬による部材切断の挙動は架構全体の倒壊方向の制御にほとんど影響しないと思われる。

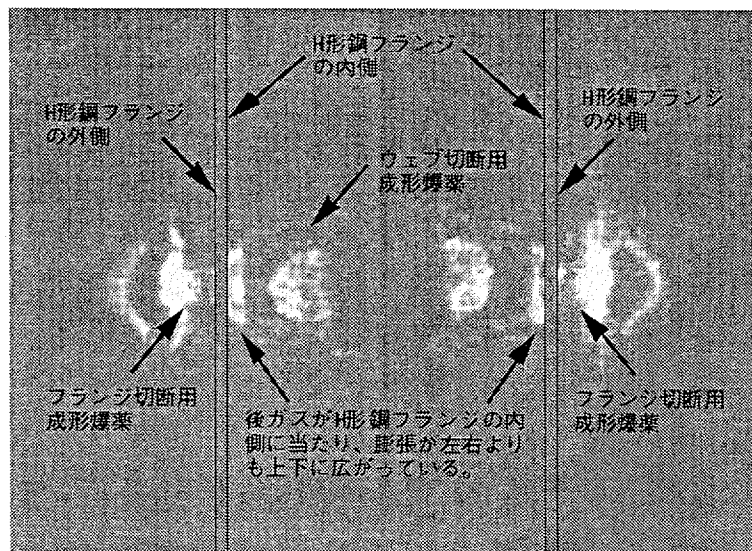
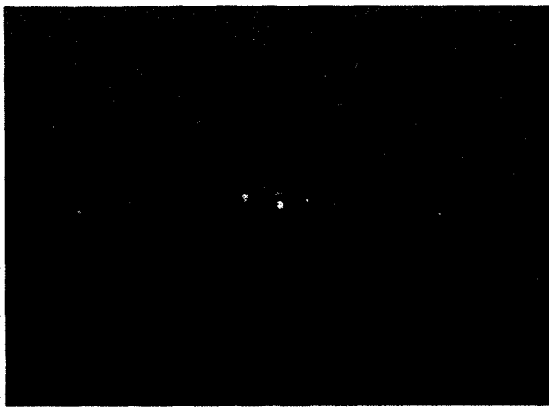
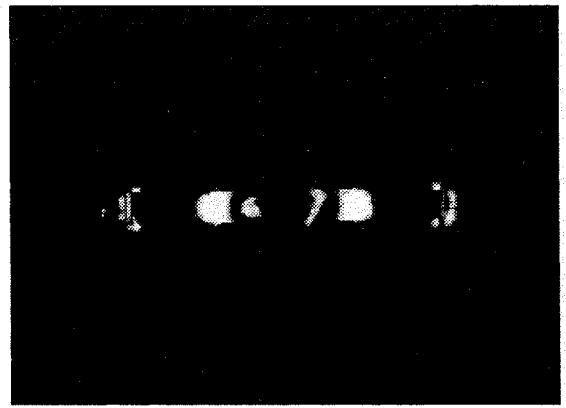


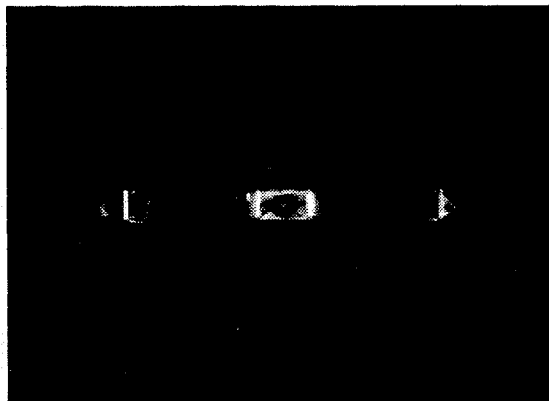
図5-4-1 起爆から $30\mu\text{sec}$ 後におけるH形鋼の切断現象に対する画像分析  
(SHN200-COD2-C08K076S09 試験体)



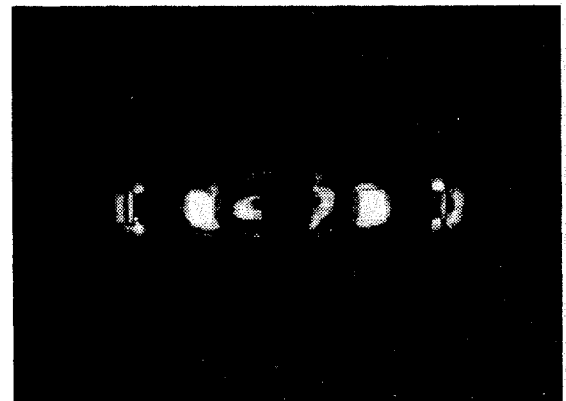
起爆開始から 10  $\mu$ sec 後



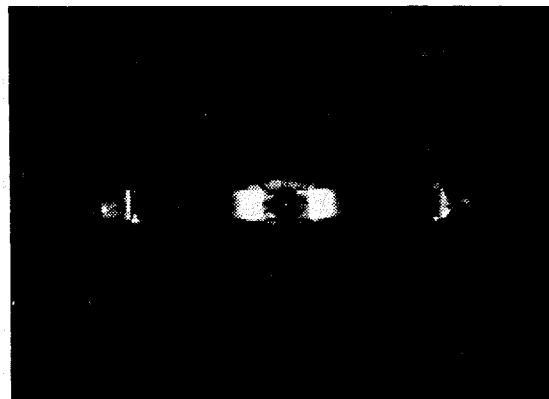
18  $\mu$ sec 後



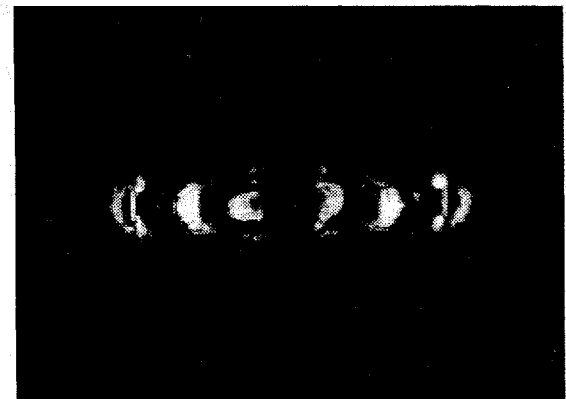
12  $\mu$ sec 後



20  $\mu$ sec 後



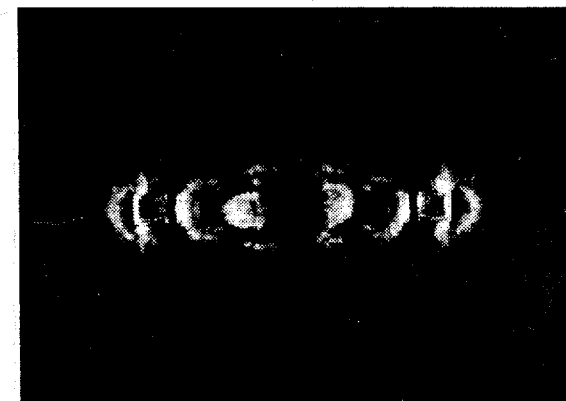
14  $\mu$ sec 後



22  $\mu$ sec 後

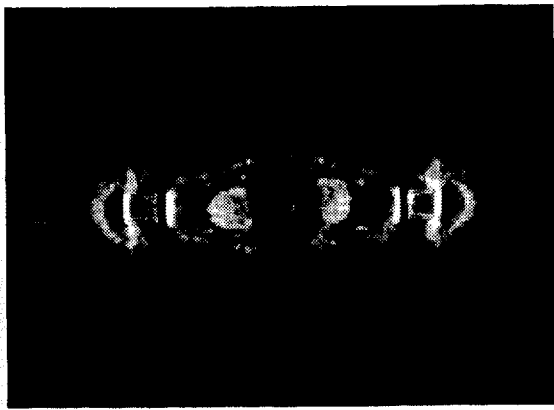


16  $\mu$ sec 後

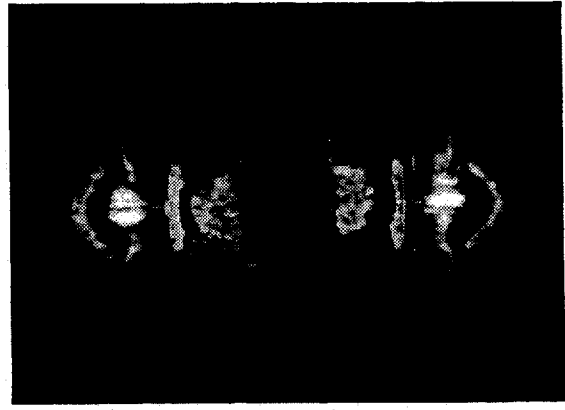


24  $\mu$ sec 後

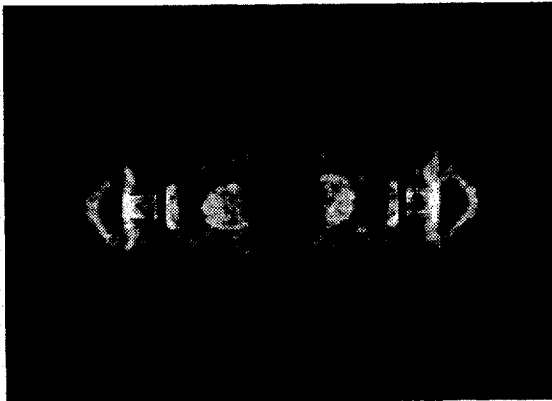
写真5-4-6 タイプB[完全切断]のH形鋼の切断現象を正面から撮影した結果  
(SHN200-COD2-C08K076S09 試験体)



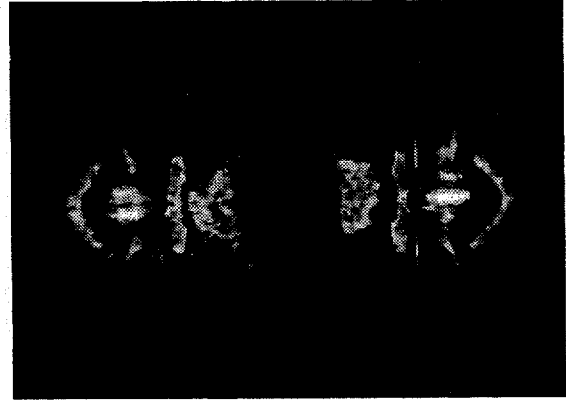
26  $\mu$ sec 後



34  $\mu$ sec 後



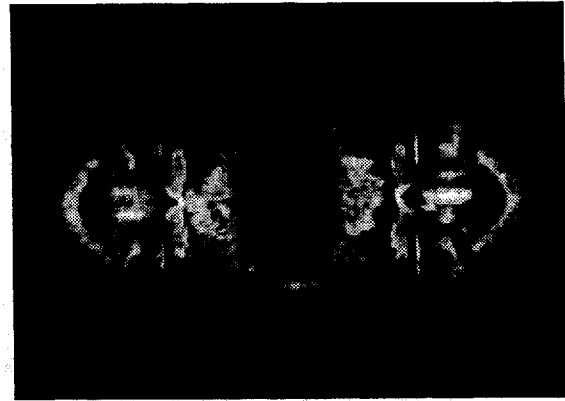
28  $\mu$ sec 後



36  $\mu$ sec 後



30  $\mu$ sec 後



38  $\mu$ sec 後



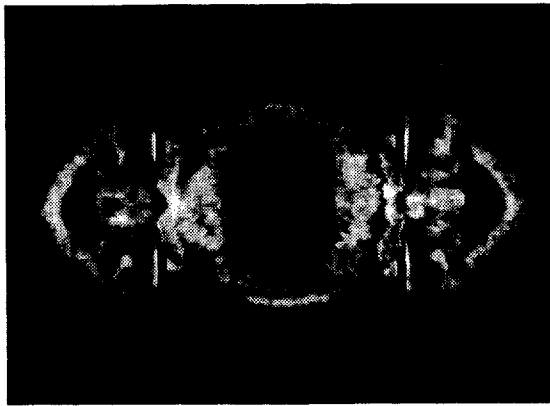
32  $\mu$ sec 後



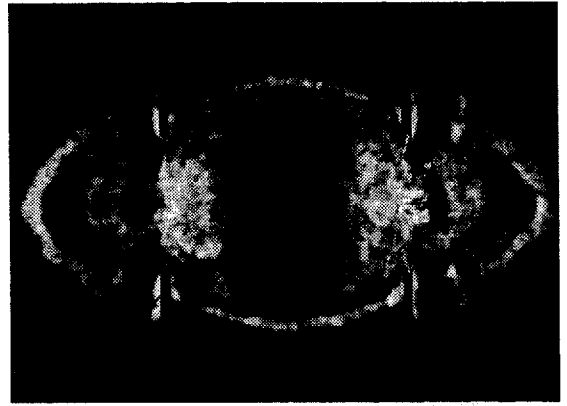
40  $\mu$ sec 後

写真5-4-6 タイプB[完全切断]のH形鋼の切断現象を正面から撮影した結果  
(SHN200-COD2-C08K076S09 試験体)





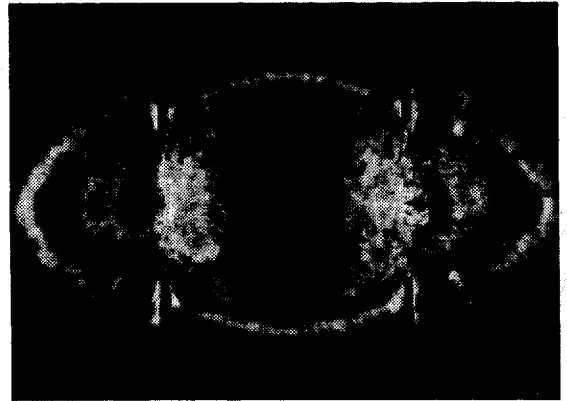
42  $\mu$ sec 後



50  $\mu$ sec 後



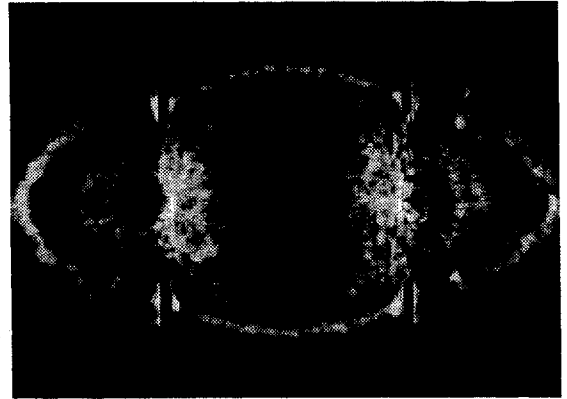
44  $\mu$ sec 後



52  $\mu$ sec 後



46  $\mu$ sec 後



54  $\mu$ sec 後



48  $\mu$ sec 後



56  $\mu$ sec 後

写真5-4-6 タイプB[完全切断]のH形鋼の切断現象を正面から撮影した結果  
(SHN200-COD2-C08K076S09 試験体)

## 5.5 まとめ

本章では、工場建家の発破解体において敷地条件を考慮した倒壊方向の制御法を提案するとともに、実在の約1/3モデルで細幅系の熱間圧延H形鋼を用いた完全切断と部分切断および部分的に切除する方法を組合せた4種類の発破実験を行い、ヒンジ機構の形成が可能であることを実験的に検証した。ここで得られた結果を要約すると、以下のようになる。

①建物を水平方向に倒壊させる場合、事前に各柱の柱頭または柱脚部にワイヤー等のテンション材を対角線上に設置し、ターンバックル等で初期張力を導入する。次に、各柱の柱頭、柱脚の2箇所ヒンジ機構を設けるための発破を行うことにより地上に倒壊させる方法が適していると思われる。

また、鉛直方向に倒壊させる場合、事前に各柱の中央部にワイヤー等のテンション材を水平に設置しターンバックル等で初期張力を導入するとともに、水平倒壊を防ぐためのテンション材をX形に設置する。次に、各柱の柱頭、柱脚および中央部の3箇所にヒンジ機構を設けるための発破を行うことにより地上に倒壊させる方法が適していると思われる。

②H形鋼柱に対する完全切断、部分切断および部分切除の方法は、成形爆薬の設置方法を工夫することにより実現可能であり、曲げに抵抗できないようなヒンジ機構の形成も成形爆薬によって制御できる。

### 【参考文献】

- 1) 小林茂雄：構造物の発破解体に関する研究、山口大学学位論文、1994
- 2) 小林茂雄，木下雅敬，中津賢一，中川浩二：鉄骨構造物の発破解体工法における設計・施工、構造工学論文集、Vol.38A、pp.1213～1225、1992.3
- 3) (社)日本建築学会編：鋼構造設計規準、1993
- 4) 中原正二：火薬学概論、産業図書、昭和62年4月
- 5) (社)火薬学会編：火薬ハンドブック、共立出版、1994.3
- 6) 佐藤忠五郎，福山郁生，若園吉一：爆破 [全訂2版]、鹿島出版会、昭和62年3月
- 7) 日本火薬工業会資料編集部：一般火薬学、平成3年4月

## 第6章 総括

本研究は、戦後の復興建物や高度成長期に建設された鋼構造建物の内、耐用年数が近づいている建物に対し発破解体法を適用し、早期解体を実施して全体工期を短縮させるとともに、次の建物を建設して土地の有効利用を実現させることを目的として行った基礎的研究について述べたものである。すなわち、鋼構造建物の発破解体の実現に不可欠な目的に応じた必要最小限の爆薬量を実験的に把握し、衝撃破壊メカニズムに関する新たな知見について論じるとともに、倒壊方向の制御法について提案した。

本研究で得られた結果を各章ごとに要約すると、以下のようになる。

### 第1章

本章は序論であり、耐用年数が近づいた建物の発破解体に関する研究の重要性および従来の研究の問題点を指摘するとともに、本研究の目的について述べた。

### 第2章

本章では、建築学の分野ではあまりなじみの少ない火薬類に関して説明するとともに、鋼構造建物の発破解体に使用する爆薬の選定条件、使用爆薬の決定根拠を示した。また、成形爆薬の概要と鋼板の切断メカニズムで定説となっているモンロー効果(ノイマン効果)についても説明した。

### 第3章

本章では、成形爆薬による鋼板の切断能力に対し、鋼板の材料強度が影響していることを示すことを目的として、第3章で得られたSS400鋼材の発破係数を用いて鋼板の切欠き深さを板厚19mmの1/3、2/3まで切欠く場合と、完全に切断する場合の3種類に制御する成形爆薬を準備し、材料強度が400、490、590、690、780N/mm<sup>2</sup>級の5種類の鋼板を組合せた実験を行った結果、成形爆薬による鋼板の切断能力に対して鋼板の材料強度が重要な因子であることを明らかにした。また、これらの実験結果を基に、材料強度を考慮した発破式を提示するとともに、国内で既に実施された鋼構造建物の発破解体において、必要以上の爆薬量が使用されていることを明らかにした。

### 第4章

本章では、成形爆薬による鋼板の衝撃破壊メカニズムを実験的に見直す試みとして、高速度カメラを用いて爆速と爆薬の挙動を記録し、鋼板の切断・破壊メカニズムについて考察を行った。また、実験終了後の鋼板を用いて冶金分析を行い、成形爆薬の爆轟に伴う衝撃力に対する鋼板の抵抗痕跡や化学成分の変化等を検証することにより、鋼板の衝撃破壊メカニズムについて新たな知見を示した。

### 第5章

本章では、工場建家の発破解体において敷地条件を考慮した倒壊の制御方法を提案し、実在の約1/3モデルで既製品の熱間圧延H形鋼を用いた完全切断と部分切断および部分的に切除する方法を組合せた4種類の発破実験を行い、倒壊方向の制御に不可欠なヒンジ機構の形成が可能であることを実験的に検証した。