

鉄管起爆試験の定量化

古川 浩*, 笠松 勇*
福山郁生**, 小川輝繁**

本論文は、爆薬や危険物の起爆性と伝爆性を同時に知る目的で37の化学物質に対し、最適試験条件を設定して鉄管起爆試験を行い、その結果をまとめたものである。また、化学物質の爆発危険性（感度）を評価するために1～7の数字によってランキングを定め、鉄管が塑性変形してから細く破断する迄の破壊モードを6つに大別した。さらにそれらのモードが生じる理由を力学的に解明するとともに、各モードに対する付加圧力とそれにもなって鉄管の管壁に生じる応力の定性的な算定方法についても解説している。これによって鉄管起爆試験法における鋼管の変形と破壊の様式を爆薬や危険物の感度の目安としても不自然でなく評価できることが明らかになった。

1. はしがき

爆薬には起爆性と伝爆性が使用目的に応じて適正な大きさを持つことが要求されているが、爆発を目的としていないのに環境の条件によって爆発の危険性を秘めている所謂危険物（化学性物質）では、起爆性も伝爆性もできるだけ小さいことが望ましい。

従来の感度試験法では起爆性については感度判定できるが、伝爆性については必しも適確な情報が得られていないのが現状である。鉄管試験法では鉄管の破壊状態から伝爆性も評価できるために感度試験の一方方法として各国でとりあげられており、現在迄に①西ドイツ。Bundes Anstalt für Material Prüfung (BAM) ②オランダ。Technological Laboratory TNO ③イギリス。EM 2 Branch, Royal Armament Research and Development Establishment (RARDE) ④フランス。Centere d'Etudes et Recherches des charbonnages de France (CERCHAR) ⑤アメリカ。National Plant Food Institute (NPFI) ⑥日本。東京工業試験所、横浜国立大学等で独自の方法による資料が発表されて来た。

これらの場合、感度は「爆薬乃至危険物が外部より入力エネルギーによって固相または固液混相から気

相に状態が変化して反応する時、その反応即ち爆発が起こらないように抵抗する性質の程度」として定義されるが、鉄管の変形や破壊状態と感度の大小との間に果して正の相関が成り立つかと云うことが問題であった。しかし、一般に反応速度が速ければ爆発時の圧力は大きく、爆発によって生じた衝撃波と共に周辺の物体に与える威力は大きいと見做されているので、鉄管の変形や破壊状態のパターンの典型的な変化から感度を判定することは無理のない考え方として容認されて来た。したがって鉄管起爆試験から爆薬や危険物の起爆性と伝爆性を確認できるのであれば、この方法は今後感度試験法として、より定量的な判定条件を設定し試験システムの規約を確立することが望ましい。かかる見地から筆者らは爆発危険性の評価に関する研究の一環として鉄管起爆試験の定量化に関する基礎実験を行っているのでその一端を簡単に御報告する。

2. 鉄管起爆試験の装置

(1) 鉄管の材料。溶接管、アルミニウム管、塩化ビニール管等を使用した結果、断目無し引き抜き鋼管の場合に破壊モードが最も明瞭に現われるので、日本油圧工業規格の油圧配管用精密炭素鋼鋼管 OST 2 (JIS G 3455 高圧配管用炭素鋼鋼管の旧規格による S TS 35 冷間仕上継目無鋼管に相当する)を使用した。

(2) 鉄管の寸法。鉄管破壊試験法では起爆感度を最大にする鉄管の内径と外径が存在することが調べられており¹⁾、硝酸アンモニウムと過塩素酸アンモニウムを6号電気雷管で起爆させた場合には、内径 $a \approx 22\text{mm}$ 、外径 $b \approx 28\text{mm}$ の時、観察し易い鋼管の破壊モードが得られている。この場合鉄管の内外径比 $k = b/a$ は

昭和55年9月29日受理

*中央大学理工学部精密機械工学科。
〒112 東京都文京区春日 1-13-27
TEL 03-813-4171

**横浜国立大学工学部安全工学科
〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156
TEL 045-335-1451

Table 1

試 料	6号電気雷管			
	1本	2本	3本	4本
アントラキノ	×	×	×	×
アントラセン	×	×	×	×
P-ニトロアニリン	△			
ジニトロアニリン	△			
P-ニトロトルエン	×	×	×	×
ジニトロトルエン	○			
トリニトロトルエン	○			
P-ニトロフェノール	×			
ジニトロフェノール	○			
P-ニトロフェノールソーダ	×			
m-ジニトロベンゼン	○			
P-ニトロクロロベンゼン	△	△	△	△
ジニトロクロロベンゼン	○			
ピクリン酸	○			
ニトロメタン	△	△	△	△
尿素	×	×	×	×
亜塩素酸ナトリウム	×	×	×	×
過塩素酸アンモニウム	△	○		
過塩素酸カリウム	×	×	×	×
過塩素酸ナトリウム	×	×	×	×
過酸化ナトリウム	×	×	×	×
過酸化ベンゾイル	△	○		
過酸化バリウム	×	×	×	×
臭素酸カリウム	×	×	×	×
臭素酸ナトリウム	×	×	×	×
亜硝酸カリウム	×	×	×	×
亜硝酸ナトリウム	×	×	×	×
硝酸アンモニウム	×	△	△	△
〃 (プリル状)	○			
硝酸カリウム	×	×	×	×
硝酸ナトリウム	×	×	×	×
硝酸グアニジン	△	○		
硝酸尿素	○			
過硫酸アンモニウム	×	×	×	×
硫酸アンモニウム	×	×	×	×
さらし粉	×	×	×	×
小麦粉	×	×	×	×

1.27であったので、今回もこの寸法を採用し鉄管の長さは設備と取り扱いの関係上20mmとした。

(3) 試料。供試材料としては表1に示す37種類の物質をそれぞれ単体で使用した。

(4) 試料の密閉方法。火薬類に比較して爆発感度の小さい試料を鉄管に充填して起爆させるためには、被包強度を増大する必要がある。それには鉄管の端部を

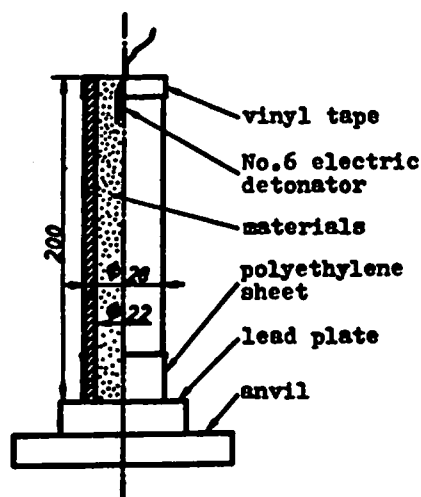


Fig.1 Dimensions of steel pipe and its closed end.

何らかの方法で閉塞しなければならない。これ迄様々な方式に関する報告²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾がなされているが、本実験では図1に示すように上端を粘着ビニールテープで、下端をポリエチレンシートによってそれぞれ密閉した¹⁾。

(5) 試料の装填比重。硝酸アンモニウムを試料に使用した時の起爆試験によれば、試料の装填比重を増大させると限界起爆エネルギーが増加する傾向にあることが判っている¹⁾。しかし実際に取り扱われる状態での装填比重はあまり大きくないと考えてよいから、この実験では鉄管の底を軽くたたいて落ち着かせる程度にした。このような方法でも、試験ごとの見掛けの装填比重の差は殆んど認められなかった。

(6) 起爆の方法。JIS K 4807 電気雷管に規定する6号瞬発電気雷管を使用し、大きな起爆力を必要とする時は雷管の数を4本まで並列に増加して同時に斉発させた。また、起爆は電気雷管による方法だけでなく、コンクリート破砕器や落槌試験機も使用してそれぞれに対する起爆性を比較している。

3. 起爆試験の結果

(1) 爆発の判定基準。砂とバーライトの混合物をブランクとして使用し、その混合比を変えることによって試料と等しい比重に調節した。実験では必ずこの混合物を図1に示した鉄管内に装填して電気雷管で起爆させ、試料との違いを比較している。ブランクの場合はいずれも雷管起爆の振動が伝わって鉄管は僅かに変形するが、目立つ応答は殆んどなく破壊も生じない。試料が完爆したと判定する基準は、鉄管のき裂が上端から下端まで伝わった場合とし、半爆の基準には亀裂が全長にわたって生じてはいないが、破壊の程度が大きく、試料の一部が爆発したと考えてよい場合とした。

また、不爆の基準には鉄管の変形がなく、試料に化学変化を生じていない場合をとっている。

(2) 試験結果。37の試料に対して実験を行った結果を表1に示した。表中の○印は完爆、△印は半爆、×印は不爆の場合を表わしている。したがって試料の起爆感度は○>△>×の順となり、不爆の場合には、完爆するまで電気雷管の数を増やして行き、4本でも不爆の時は、その段階で不爆と判定した。尚コンクリート破砕試験器と落槌試験器を用いたときは、試料が鉄管起爆試験と同じ状態になった時を目視によって判定し完爆○、半爆△、不爆×とした。

(3) 爆発危険性の評価。前記の化学物質を試料としたときの爆発危険性(感度)を定性的に評価する目的で次のような点数付けをしてみた。

即ち、電気雷管による起爆のほかに、コンクリート破砕器および落槌式感度試験機を使って起爆させ、いずれかの起爆法で完爆したときを0点、半爆を1点、不爆を2点とし、三つの起爆法による合計点に一点を加えることにした。このようにすると三つの起爆法で総て完爆する物質の点数は1点、不爆のものは7点となり、物質の爆発危険性は高い方から順次 1, 2, …… 7のように7階級にランク付けすることができる。その結果を示したのが表2で、これから化学物質の大まかな感度が評価される。ただこれらの試料には試験法によって反応速度が多少変化する傾向が認められ、こ

Table 2

試料	6号電気雷管	コンクリート破砕器	落槌	危険性の評価
過塩素酸アンモニウム	△	○	○	2
硝酸尿素	○	△	△	3
過酸化ベンゾイル	△	△	○	3
亜塩素酸ナトリウム	×	△	○	4
過塩素酸ナトリウム	×	△	○	4
過塩素酸カリウム	×	△	○	4
ジニトロトルエン	○	△	×	4
硝酸アンモニウム	×	△	○	4
臭素酸カリウム	×	×	○	5
臭素酸ナトリウム	×	×	○	5
硝酸グアニジン	△	△	×	5
過酸化ナトリウム	×	—	△	6
亜硝酸ナトリウム	×	×	△	6
硝酸カリウム	×	×	△	6
硝酸ナトリウム	×	×	△	6
過酸化バリウム	×	—	×	7
亜硝酸カリウム	×	—	×	7
硫酸アンモニウム	×	—	×	7
さらし粉	×	×	×	7

の現象は爆発などの化学反応を誘起させるいくつかの因子の反応に対するかかわり方の割合が、試験法が異なると試料によって違ってくるものと推定される。

Table 3

起爆感度大	ジニトロトルエン	臭素酸ナトリウム
	硝酸尿素	硝酸アンモニウム
		臭素酸カリウム
		亜塩素酸ナトリウム
	過塩素酸アンモニウム	過塩素酸アンモニウム
		過塩素酸ナトリウム
		過酸化ベンゾイル
		過塩素酸カリウム
	過塩素酸アンモニウム	硝酸カリウム
	過酸化ベンゾイル	硝酸ナトリウム
	硝酸グアニジン	硝酸尿素
	硝酸アンモニウム	過酸化ナトリウム
		亜硝酸ナトリウム
6号電気雷管	その他	その他
コンクリート破砕器	ジニトロトルエン	臭素酸ナトリウム
	硝酸アンモニウム	硝酸アンモニウム
	硝酸尿素	臭素酸カリウム
	過酸化ベンゾイル	亜塩素酸ナトリウム
	硝酸グアニジン	過塩素酸アンモニウム
	過塩素酸ナトリウム	過塩素酸ナトリウム
	過塩素酸カリウム	過酸化ベンゾイル
	亜塩素酸ナトリウム	過塩素酸カリウム
落槌	硝酸カリウム	硝酸カリウム
	硝酸ナトリウム	硝酸ナトリウム
	硝酸尿素	硝酸尿素

即ち、ある限られた範囲内の現象ではあるが、試験法によって比較的反応し易い物質と必ずしもそうでない傾向のものが存在することが認められる。落錐感度試験の場合には試料に入るひずみエネルギー密度が他の試験法と比較してむらがなく、平均してやや高い値となり、内部で衝撃が伝播する動的な機構から反応温度に到達し易い状態となる構造と組成を持った試料の方が、逆に反応し難くなる試料より多いようである。

この試験法別の起爆感度を表3に示した。

以上は(Ⅰ)危険な化学物質の一部に対する筆者らの実験結果を纏めたものであるが、本論文の目的はこれとともに(Ⅱ)鉄管起爆試験で生じる鉄管の変形と破壊に関する6つのモードが如何なる理由によるものであるかを解明することと(Ⅲ)各モードに対する爆圧および鉄管内の応力を定量的に求めることにある。それは(Ⅱ)と(Ⅲ)が明確になれば爆薬や危険物質の感度を正確に評価することができるからであるが、三次元の弾塑性破壊力学が未完成である現在では(Ⅲ)に対する正確な解答は今後の問題と云えよう。しかし、現場ではこれらの変形・破壊モードに対して1対1に対応する爆圧の大まかな数値の推定方法が強く求められているので、今回は(Ⅱ)とともに(Ⅲ)の爆圧を推定する時に目安となる一つの考え方を述べてみたい。

4. 鉄管の変形・破壊パターンと爆圧の関係

(Ⅰ) 鉄管の変形と破壊のモード

種々の化学物質の爆発に対する鉄管の破壊モードは図2のように大別される。鉄管破壊試験では、爆発性物質の起爆性を鉄管の変形と破壊の状態を目視によって判定しているが、その理由は変形と破壊のモードが爆発による内圧の増加とともにはっきり異なった型式に変化して行くからである。これから各モードに対応して爆発圧力とそれによる歪エネルギーに相違のあるこ

とが容易に推察され、物質の危険性をクラス別に分けることが可能となる。そこで各モードに対する爆発圧力や鉄管に与えられる歪エネルギーとの関係が定性的乃至定量的に確立されれば、鉄管起爆試験の信頼性はとみに増加し、飛躍的に実用性が高められることになる。

物理的には鉄管の変形と破壊のモードは爆発時に鉄管に与えられる歪エネルギーから評価することが望ましい。そのためには変形量(歪)と圧力(応力)を正確に知る必要があり、ことにクラックが発生することによって吸収される歪エネルギーの算出が問題となる。

筆者らは先にも述べたようにこれらの関係の定量化を目ざした基礎実験を進めているが、何よりも爆発時における応力-歪線図が正しく求められることが先決問題となっている。図2はいづれも鉄管の左端に近い軸線上に6号電気雷管がセットされた時のもので、鉄管内に充填された化学物質の感度が良く、爆圧が高くなるにつれて鉄管は①から⑥のモードで変形し破壊される。

①は左端に近い部分のみが膨れ上がった塑性変形を示しており、内圧がこの箇所で最大となって管壁には塑性応力が発生し、他の箇所は弾性応力状態にあったことを物語っている。

②ではこの箇所の応力が鉄管の破壊応力に達して爆圧による歪エネルギーを鉄管の塑性変形のみでは吸収できず、亀裂を生じることによって表面エネルギーの増加として吸収したことを示している。①、②とも左端に近い箇所に最大圧力が発生する理由は図1のように、爆源が鉄管の左端に近い軸線上にあることから丁度弾丸を発射した時の砲内圧力(図3)と同じ状態に

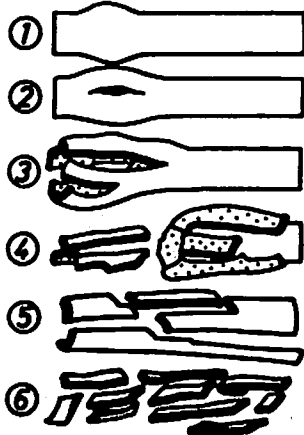


Fig.2 Fracture mode of steel pipe.

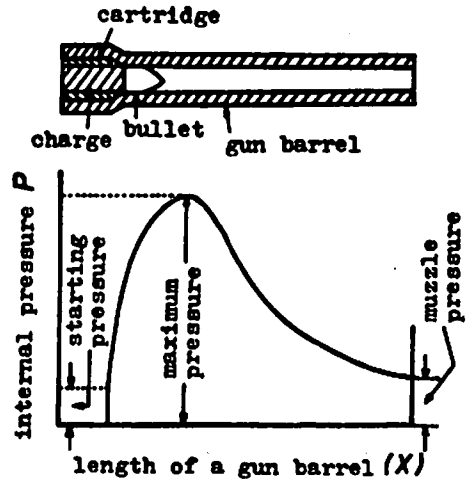


Fig.3 Internal pressure-distribution of a gun.

なることによるものと理解される。なお、図2の左端は図1の上端に相当している。

③は鉄管内に充填された化学物質の反応速度が①、②に比較して速くなり、爆圧が高くなった時のモードで、鉄管は左端から軸線方向にほぼ等間隔で短冊状に裂けはじめ、更に爆圧が高くなると④のように外側にそれらの自由端がめくれ上がった形となる。もっと爆圧が高まると短冊状の一部は破断して鉄管から分離するようになるが、これら一連のモードは爆轟によって鉄管内に生じた衝撃波が伝播する模様から解釈することができる。即ち衝撃波は応力を伴った弾塑性波として伝わり、弾性波が先行するものであるが、この応力波は縦波と横波の形で伝播する。前者は後者よりかなり速く（鋼管の中では約2倍）、異なる物質の境界に入射した時にはその一部は透過し、他は反射される。

したがって入射波が伝える応力 σ_i は反射波 σ_r と、透過波と σ_t にそれぞれ配分され、その割合は媒質の物理的特性によって決まる。流体と同じように境界条件として応力と粒子速度の連続性があり、これらを適用することによって入射応力波に対する反射および透過応力波の関係が次のように導かれる。

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_i} = \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{2\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \quad (2)$$

ここに ρ_1, ρ_2 と C_1, C_2 はそれぞれ境を接する媒質の密度と波の伝播速度である。

(1)式と(2)式より $\rho_1 C_1 = \rho_2 C_2$ のときは境界の左右の媒質は同じであって、 σ_r/σ_i は零となり、反射波は無く応力波はすべて透過して行く。 $\rho_1 C_1 < \rho_2 C_2$ のときは（例えば水から金属に入射する場合） σ_r/σ_i は正で、このことは σ_i が初め圧縮波であるならば反射波もまた圧縮波となることを意味している。また、 $\rho_2 C_2 = 0$ ならば境界条件は自由表面と云うことになり（例えば金属から空気の場合はこれに近い）、 $\sigma_r = -\sigma_i$ となって入射波が圧縮波ならば反射して膨張波となる。

(2)式から明らかなように透過波は常に入射波と同符号であるから、入射波が圧縮波なら透過波も圧縮波、膨張波の場合も同様にそのまま膨張波として伝播して行く。

鉄管起爆試験の左端（図1では上端に当る）では、鉄管は空気に接する自由端と見做してよいから管端を拘束するものは全くなく、したがって応力は零でなければならない。そのためには圧縮応力を伝達する圧縮波が入射した時の自由端では符号を逆にした負の応力即ち張力を伝える膨張波が発生することになる。その結果図4のように鉄管の自由端から反射波の波頭まで

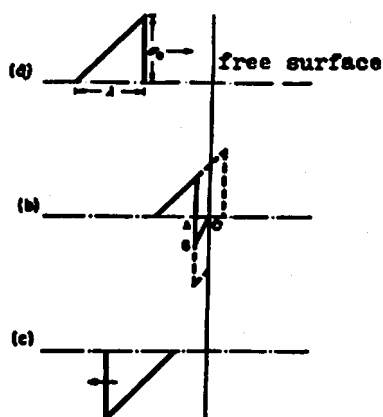


Fig. 4 a, b, c. Reflection of transient sawtoothed shape stress wave at free surface.

の管内の引張り応力の大きさは OAB となって、反射する張力は次第に増大して行く⁷⁾。一方、鉄管の周方向には爆圧によって管が外方へ広がるために圧縮応力 σ_θ が生じており、その大きさは自由端から反射して来た引張り応力 σ_z より大きい。しかし反射波である $\sigma_r = \sigma_z$ の値 AB が大きくなって $\sigma_\theta + \sigma_z$ の値が鉄管の動的降伏応力の値 σ_{dy} に等しくなれば、鉄管には塑性変形が発生するに至る。このことは図5のMises および Tresca の降伏条件より考えても明かであっ

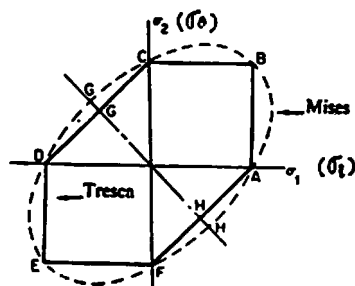


Fig. 5 Mises yield condition (ellipse) and Tresca yield condition (hexagon) in two dimensional representation.

って、周方向の圧縮応力 σ_θ と軸方向の反射波による引張り応力 σ_z が組み合わされて偏差応力成分が大きくなり、一軸の引張り又は圧縮による降伏応力よりそれぞれの値が小さくてもその合応力によって鉄管は降伏し、更に応力が増大して行くと破綻が生じる。2つの応力の大きさは $\sigma_\theta > \sigma_z$ であるから亀裂は必ず σ_θ に直角な方向、即ち軸線に平行に走ることになる。

なお、図2の③のようなモードが生じる厳密な理由は、鉄管が圧延された薄い鋼板から絞り引抜き又は

接合の工程を経て製造されるために、軸線方向には金属の結晶粒が変形して細長く延ばされた形で並ぶことになり、繊維組織 (fiber structure) と呼ばれる構造となっていることに起因している。鉄管の強度は繊維が通っている所は強く、その中間は弱いので周方向の強い力が働くと弱い層が必ず軸線に沿って管端から裂け始める。亀裂は $\sigma_\theta + \sigma_z$ が最初に破断応力 σ_{dR} に達した左端より軸線に沿って右端に伝播して行き、③のように短冊状の細長い切れの入った薄板が何枚かできることになる。内圧の関係でこれらの短冊状の切片は爆圧が増加すると④のように外方にめくれ、伝爆性がよい場合には亀裂は左端より右端迄貫通して鉄管は軸線に平行なほぼ等間隔の n 個の板に分かれる。 n の値は鉄管の寸法、内外径比、残留歪および潜在的な微視的クラックや傷の有無に関係する。試料の起爆性と伝爆性が極端に良い時には鉄管は二次乃至三次のり面に沿って新しいクラックが入り、このために⑤のような軸線と 30° 乃至 45° の角度に破断面が数多く発生する。至 45° の角度に破断面が数多く発破断面の長さを大きくしてエネルギーを吸収するので⑥のモードのように全体が細かい小切片に破断される。

5. 鉄管の対衝撃強度と各破壊モードに対する爆圧の算定

鉄管の内圧による変形と破壊および破断は、圧力の増加とともに内面が先づ降伏し、次第に外方に降伏領域が進展して肉厚全域が降伏した後、漸次全体の塑性変形量は増大して行く。応力が最大引張り強さに達すると鉄管には破壊が始まり、遂に破断にいたるが、鉄管起爆試験のように衝撃圧が内面に作用した時と、水圧のような静圧が負荷された場合では鉄管に生じる応力-歪線図はかなり異なったものとなる。数多くの軟鋼を静的および動的 (衝撃的) に引張った場合の応力-歪線図では、静的破断応力 σ_R は静的降伏応力 σ_y の約3倍、衝撃的に負荷した場合の降伏応力 σ_d も σ_y の2~7倍となっており、弾性限が静的負荷の場合と比較して歪速度が大きくなるにしたがって高くなることが明かになっている⁹⁾。

本来、破断は材料に与えられた歪エネルギーがその材料によって定まる一定の値に達した時に生じるものであるから、衝撃負荷時のように弾性限が増大すれば静的負荷時と比べて歪は小さくても破断が起こる。即ち、破断する迄の応力-歪線図と歪軸との間の面積は材料によって一定の筈であるから、歪速度が大きくなると低温で負荷した時と同じ傾向を示すようになる。低温衝撃による脆性破壊では、材料のエネルギー吸収能力が低下して衝撃的な負荷を受けた構造物は殆んど塑性変形を示さず瞬間的に破断するが、鉄管起爆試験

でも歪速度が材料の臨界衝撃速度以上になると管壁に生じた応力は大き過ぎて伝播せず、破断によって与えられたエネルギーを表面エネルギーの増加と云う形で吸収することになるからである。また応力波の値がそれ程大きくなくても鉄管内の反射・干渉などによる重畳によって試料全面に亀裂の入ることが多い。したがって衝撃破断応力 σ_{dR} は σ_y のほぼ $3 \times (10 \sim 30)$ 以上の大きさと考えられ、負荷条件によってかなりの幅をもった値となる。表4に3次元の応力を一軸方向の相等応力に換算したときの静圧と衝撃圧に対する降伏 (Yield) 応力、崩壊 (Collapse) 応力、および破断 (Rupture) 応力の比率を示した。

Table 4

負荷圧力 応力	静 圧	衝撃圧 (爆圧)
降伏応力	$\sigma_y = 1$ とすると	$\sigma_{dy} = (2 \sim 7) \sigma_y$
崩壊応力	$\sigma_c = (1.5 \sim 2.5) \sigma_y$	$\sigma_{dc} = (1.5 \sim 2.5) \times 10 \sigma_y$
破断応力	$\sigma_R = 3 \sigma_y$	$\sigma_{dR} = 3 \times (10 \sim 30) \sigma_y \sim$

ウゴニオ (Hugoniot) はこの考え方に基いて高歪速度で負荷された材料の応力-歪線図を予想し、図6の点線で示すような線図を想定している。

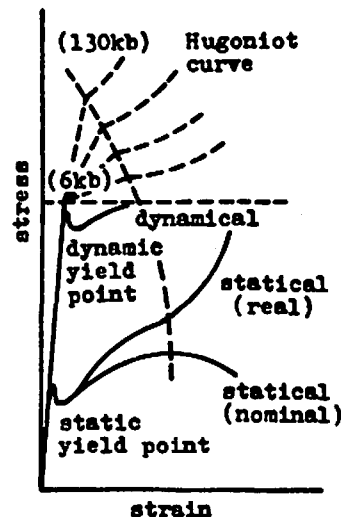


Fig. 6 Stress-strain relation.

このような動的な材料の挙動について西村¹⁰⁾は、鉄管内で衝撃的な内圧が作用する時の管壁に生じる半径方向の応力 σ_r と周方向の応力 σ_θ を、鉄管を弾性体として、図7のように軸方向 z については平面歪であるとした時の半径方向の釣合の式を立てて求めた。

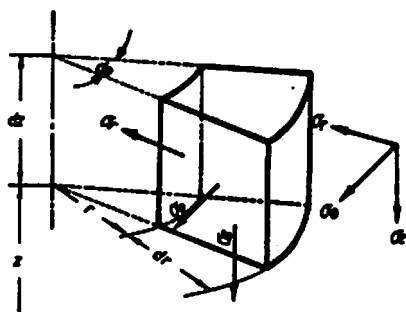


Fig. 7 Stresses acting on elementary segment in polar coordinates.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} \right\} \quad (3)$$

ここに ρ : 鉄管の密度, u : 半径 r 方向の変位, E , ヤング率, ν : ポアソン比, t : 時間である。この時 $r=a$ なる内面に加わる爆圧の形 $f(t)$ は, P_m を最大圧, t_m を作用圧力がかかりはじめてから最大圧に達する迄の時間, t_0 を内圧が作用し始めた時間として

$$f(t) = P_m \frac{t+t_0}{t_m} \exp \left\{ 1 - \frac{t_0+t}{t_m} \right\} \quad (4)$$

と置くと, σ_r と σ_θ はともにベッセル関数を含んだ複雑な形となる。その解は紙面の都合上割愛するが, 実際の σ_r は $f(t)$ による鉄管の強制振動応力と自由振動応力の2種類の組み合わせになっている。衝撃的な負荷を与えた時弾性限が上昇するのは静圧では生じないところの負荷時に誘起される自由振動応力に加わるためであってこれより鉄管の変形する様子, 特に応力-歪線図が厳密に計測されれば正しい破壊応力, 破断応力もモード①から⑥に対応して算出できることになる。しかし現状では管の共振などもあって正確な高歪速度の応力-歪線図の完成は今後の問題であるので, 鉄管起爆試験における破断応力および圧力を定性的に算出するために図6から σ_y を基準として負荷条件を考慮した上で衝撃(動的)破断応力 σ_{dR} と破断圧力 p_{dR} を推定することにする。

静圧 p が鉄管の内面に作用した時の内面降伏圧力 p_f に関しては Tresca, Mises などの式があり, 管全体が降伏する時の圧力 p_f には Nadai, 破断圧力 p_R については Faupel, 和智・富安, Manning 等の式がある。この中で Mises のせん断ひずみエネルギー説

$$p_f/\sigma_y = (k^2 - 1)/\sqrt{3}k \quad (5)$$

に筆者らの鉄管起爆試験に使用した鋼管の値, $\sigma_y = 50 \text{ kgf/mm}^2$, 内外径比 $k = 1.27$ を代入すると $\sigma_y = 1400 \text{ kgf/cm}^2$ となる。また爆轟時の各圧力は表4を基に応力と圧力が対応するものとして, 表5のように推定することができ, 破断圧力は静圧で約 4200 kgf/cm^2 , 衝撃圧

Table 5

負荷圧力	静圧 kgf/cm^2	衝撃圧 (爆圧) kgf/cm^2
降伏圧力	$p_f = 1,400$	$p_{dY} = 2,800 \sim 9,800$
破断圧力	$p_R = 4,200$	$p_{dR} = 42,000 \sim 126,000$

(爆圧)では破壊モードにより 42000 kgf/cm^2 乃至 126000 kgf/cm^2 となる。

6. むすび

鉄管起爆試験の重要性が認識されるにつれ, 各国では信頼性ある規格の制定を目指して基礎的研究が積み重ねられている。筆者らもその一環として, (I)この試験法の最適条件を設定し, 37の試料に対して実験した結果をまとめると共に19の危険物を1~7の数字によって危険性の評価を行った。また, (II)鉄管と破断のモードが6種類に大別でき, 且つそのようなパターンが生じる理由を解明し, (III)定性的に動的降伏応力破断応力を生じる圧力の大きな値を求めてみた。

各破壊モードに対する破断応力およびその時の衝撃圧力の定量的な算出には爆発現象の時間的経過にともなう正確な鉄管の応力-歪線図による歪エネルギーの計測を基とした破壊力学によらねばならない。現在クラックの尖端の近傍で亀裂下面より尖端を左内側に包んで反時計方向に亀裂上面に達する任意の閉ループを考え, このループに沿って材料にたくえられるひずみエネルギー密度を計算すると, その値 J (これを J 積分と呼んでいる) が材料によって定まる一定値より大きくなる時亀裂が進展することが二次元の場合で知られている。鉄管起爆試験の場合はこれを三次元に拡張しなければならず, 破断した切片の表面積の増加量の精密な算出とともにこれから問題であるが今後の弾塑性破壊力学の発展に期待したい。

終りに本研究は(財)火薬技術奨励会よりの助成金を得て行ったもので, 実験に当たっては百瀬文隆君の熱心な御協力を得た。ここに心からの謝意を表する。

文 献

- 1) 福山郁生, 工業火薬, 20-2 (1959), 31
- 2) 大久保正八郎, 工業火薬, 27-2 (1966), 101
- 3) 大久保正八郎, 工業火薬, 24-6 (1963), 329
- 4) 水島容二郎, 工業火薬, 31-4 (1970), 328
- 5) 水島容二郎, 工業火薬, 33-1 (1972), 23
- 6) 古川浩, 工業火薬, 30-4 (1969), 2
- 7) RINEHART and PEARSON; Explosive Working of Metals; PERGAMON PRESS (1963)
- 8) 岩崎安宏他, 日本機械学会誌, VOL 77, NO. 673 (1974), 65

- 9) 高橋清, 兵藤申一, 工業火薬, 27-5 (1966), 280
10) 西村源六郎, 振動工学, (1969) 379 誠文堂新報社

- 11) I. Fukuyama, Propellants and Explosives 5,
94-95 (1980).

Quantification of steel tube detonation impact test

By Hiroshi FURUKAWA*, Isamu KASAMATSU*
Ikuo FUKUYAMA** and Terushige OGAWA**

This paper describes the results of test on steel tube detonation impact in order to examine the initiation property and transmissibility of explosives and dangerous materials at the same time under the most suitable testing condition for 37 chemical materials.

We classified the rank of numbers from 1 to 7 so as to evaluate the sensitivities of chemical materials, then divided fracture modes into six parts from plastic deformation to fragmentary rupture.

Besides we explained the reasons why these modes arised and also theoretical explanation were made for the qualitative calculation methods of stress produced in the wall of steel tube under additional pressure.

(* Faculty of Science and Engineering, University of Chuo, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan.

**Faculty of Engineering, Yokohama National University. 156 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama, Japan)