

管に充填した爆薬の爆発現象

永山邦仁*, 藤田昌大*, 清田堅吉**

塩ビ管に SEP 爆薬を充填して爆発させたときに生じる爆風および飛散物の膨張を瞬間X線写真および高速度写真により調べた。さらに、爆風と塩ビ管が周囲へおよぼす影響を爆薬のまわりに配置したアルミ板の損傷をみることにより調べた。

一連のX線写真から塩ビ管破片は、ほぼ管軸と垂直な方向へ膨張してゆくことがわかった。高速度写真の詳しい解析から、爆発ガスの流れは、飛散物により著しく拘束されること、すなわちガスは飛散物を追い越せず、下方へ激しく吹出していることがわかった。

アルミ板の損傷は、飛散物が粒子状というよりむしろ繊維状であることを示している。顕著な特徴としては爆薬直下方に置いたアルミ板に浅い溝状傷が大きな円を描いていることである。その原因は、細い糸状の飛散物が下方への激しい爆発ガスの流れに乗って運ばれるからであると考えられる。

1. 緒言

爆発加工実験、施工にかぎらず、爆発する危険性を有する物質を取扱う機会が増大している。その場合、爆発にともなう、空中に強い衝撃波(爆発波)が発生するだけでなく、爆薬に接して、あるいは隣接しているものの破壊、飛散が考えられる。したがって、この様な爆風や高速の飛散物による周囲の被害をなくする、あるいは最小限にとどめるための防護対策を講じることが最も重要である。しかもその防護方法は、個々の爆発条件に強く依存すると考えられ、条件に応じた方法を工夫する必要がある。そのためには、種々の条件下での爆風や飛散物の強さ、方向性等についての情報が蓄積、整理されねばならないであろう。

しかしながら、爆風に関するこれまでの研究は、球対称とみなせる場合に関するもの¹⁾が殆んどであり、また爆発による材料の破壊についての研究もなされているが²⁾、飛散物の挙動という立場に立つ研究は、雷管破片の運動の研究³⁾など少数の試みを除けば、あまり系統的な研究はなされていないのが現状である。

ここではまず比較的簡単な爆発条件として塩化ビニール管に爆薬を充填する場合を取上げ、爆発によって生じる塩ビ管破片の飛散および爆発ガスの膨張について詳しく調べた。特に飛散物の速度、空間的な分布および密度分布に着目し、瞬間X線法による写真観測

をおこなった。また、爆発ガスの膨張の様子は、高速コマ撮りカメラ撮影によって調べ、飛散物のX線写真と比較した。更に飛散物による周囲への影響を具体的にみるため、爆薬部のまわりに数枚のアルミ板を配置し、いくつかの爆発条件について、アルミ板の損傷状態について比較検討した。

2. 実験

市販の塩ビパイプ(主として直径32mm,長さ30mm,厚さ3mm)にSFP爆薬をつめたもの(薬量20g)を以下に述べるいくつかの条件の下で爆発させた。

高速で飛散する塩ビパイプの破片は、不透明な爆発ガスで隠されるので、Fig.1に示すように飛散物のみを観測するために瞬間X線法を用いた。使用したX線システムはHewlett-Packard社製のFEXITRON Model 271で、X線閃光時間約30nsのものである。精度の高いX線写真を得るには、X線放射ガンと被写体(爆薬と塩ビパイプ)との距離をはなし、被写体とX線フィルムカセットとをできるだけ近づけることが

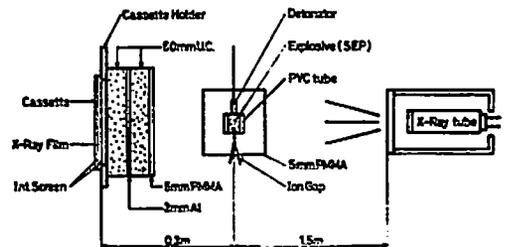


Fig.1 Experimental setup for flash radiography.

昭和54年3月3日受稿

*熊本大学工学部 〒860 熊本南風雲2丁目39-4

**八代工業高等専門学校 〒866 八代市平山町2627

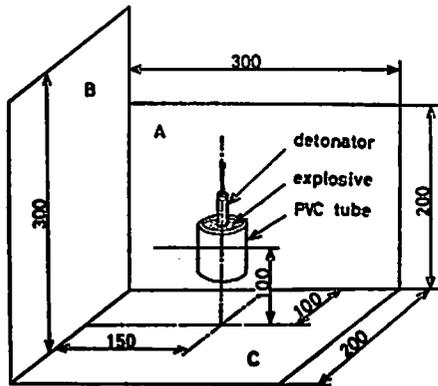


Fig. 2 Experimental setup for aluminum plates injury by PVC fragments.

必要である。Fig. 1 のようなスポンジとアルミ板、アクリル板との組合せを工夫して⁴⁾、X線フィルムカセットを爆薬へ30cmの距離まで近づけた。X線発射ガンは、爆薬から1.5mの距離においた、用いたX線システムは単発なので、飛散物分布の時間変化は、次の方法でX線発射時刻を変えた数枚のX線写真から調べた、すなわち爆薬底部に5mm程度差込んだ導線よりイオンギャップ法で、トリガパルスを発生させ、適当な遅延時間を設定してX線パルスを発射させた。また、爆発ガスの膨張の様子は、通常の光学的観測が可能なので、毎秒最高20万駒の高速駒撮りカメラで観測した。発光時間約1msのキセノンランプを光源とし、爆発ガスの輪郭をシルエット写真として撮影する。

次に、爆発ガスや塩ビパイプ破片による周囲への影響を見るのに、3枚の3mm厚のアルミ板(200mm×

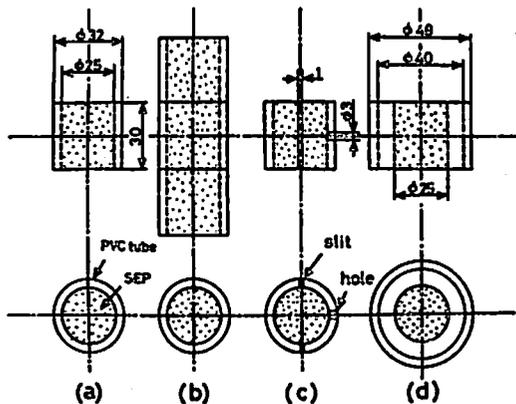


Fig. 3 Experimental conditions of explosives and PVC tubes.

300mm)を、直度する3面となる様に組立て、爆薬部をFig. 2に示す位置に吊下げた。Al板3面のうち、1面(C面)は爆撃方向(あるいはそれと逆方向)に対面させ、他の2面は、軸対称爆発として爆発部からの距離を変え、塩ビパイプ飛散物膨張の距離による変化を調べる。アルミ板損傷の様子は、X線写真や高速写真による飛散物や爆発ガス膨張の様子と比較して、それらと傷痕との関連を調べる。

アルミ板損傷の実験にかぎり、Fig. 3に示すような4種類の爆発条件について実験をおこなった。すなわち

- (a) 塩ビパイプにSEPを充填させる、
- (b) (a)を2個、3個と積み重ねる、
- (c) 塩ビパイプに縦方向の細いスリット(約1mm幅)を設ける(スリットと90度異なる方向に直

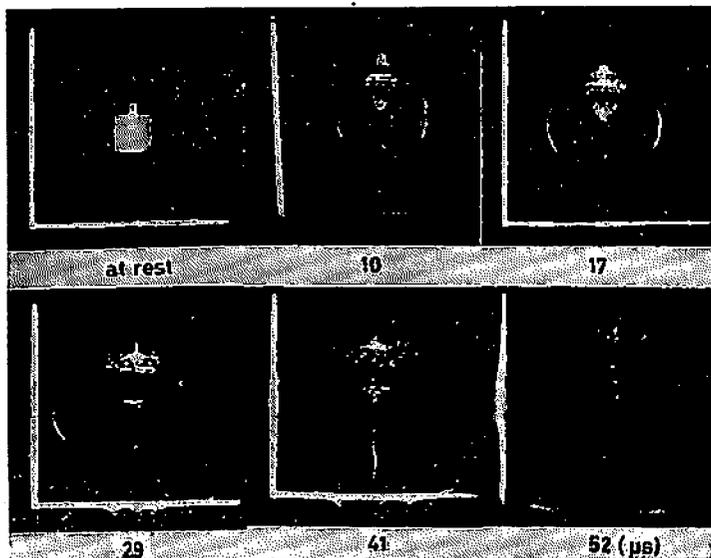


Fig. 4 Successive radiographs showing the expansion of PVC fragments.

径 3mm の小孔も設けた),

(d) 塩ビパイプと爆薬との間に空隙を設ける, などと条件を変化させ, (a) の場合を標準として, 他の場合と比較する。

3. 結果

Fig. 4 は得られた X 線写真である。塩ビパイプ破片は次第にふくらみ, 急速に膨張している。遅延時間の早い写真 (Fig. 4 (b), (c) 参照) からわかるように, パイプ破片飛散物は, その上, 下方向への運動が小さく, 多少のむらはあるがほぼ一様に分布している。破片の上下の境界から激しく吹出している爆発ガスが写真に捉えられているが, その膨張先端は希薄化して判別できない。爆発後 41 μ s 後の写真, Fig. 4 (e) では, 破片が繊維状に連なっているのが観察される。雷管破片の膨張はきわめて緩やかであり, 飛散の方向は上方へかぎられている。Fig. 4 では, 爆薬部から 10cm 離して立てて置いた 5mm 厚の亚克力板の破壊の様子も見る事ができる。塩ビ飛散物が衝突した後, 破壊が進行しており, 飛散物に先行すると考えられる空中の衝撃波による影響は認めることができない。

Fig. 5 は, Fig. 4 からパイプ飛散物の分布の形をトレースしたものを示した。トレースの上, 下端の印は飛散物分布の境界を示し, 数字は, 爆発後 X 線放射までの時刻を表わしている。破片の上, 下方向への拡がりには小さく, 角度 10~15 度程度に限られており, 起爆側 (上方) への膨張角が下方のそれより大きいことが Fig. 5 から知れる。

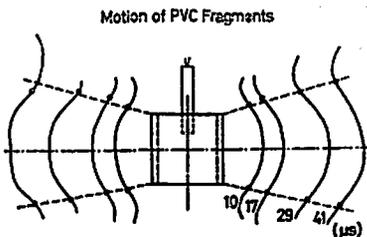


Fig. 5 Traces of the flash radiographs of the expansion of PVC fragments. Numbers on traces denote time after explosion.

Fig. 6 は, 同じく場合 (a) での爆発ガス膨張の高速撮影写真のトレースである。トレース上の数字は, 起爆直前を参照時刻とした時刻 (μ s) を示している。視測に際しては, カメラの視野がかぎられているので, 視野内で爆薬位置をずらして撮影した 2 つの高速撮影写真のトレースを合成した。横方向への膨張は, パイプ破片のそれと類似しているが, ほぼ 45 度より下

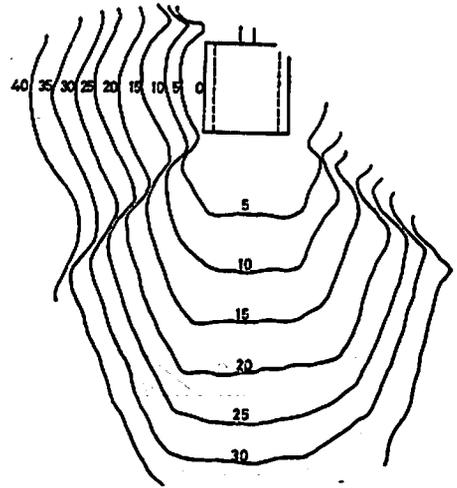


Fig. 6 High-speed photography traces of the expansion of detonation gases. Numbers on traces denote time after explosion in μ s.

方へ激しく吹出しているガス塊が見られるのが特徴的である。

Fig. 7 は, 爆発条件 (a) の場合のアルミ板の損傷の様子を示している。図には, 展開図風に 3 枚の写真を並べた。A, B 両面は塩ビパイプの横方向にあたるが, 両面とも傷痕は繊維状であり, 有限の幅を持っている。このことは, X 線写真に現われたように塩ビパイプは細かい破片とはならず, 繊維状に連なって飛散することと符合している。塩ビパイプからの距離が遠い B 面の方が A 面より傷痕幅は広い, ちなみにその幅は A 面では 70mm, B 面では 85mm である。この傷痕の範囲は, Fig. 5 のトレースで明らかにされた飛散物の膨張角の延長上にあたる事がわかった。逆に塩ビパイプ破片は膨張飛散の途中でその運動方向を変えないことが推察される。C 面では中央部にへこみを生じ, しかも爆発ガス噴出境界とみなされる方向 (約 45

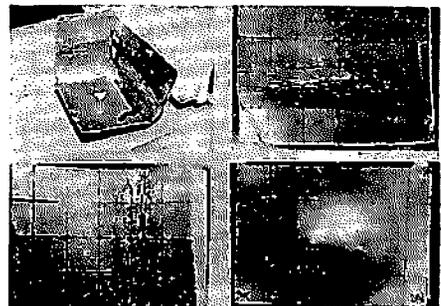


Fig. 7 Injuries on aluminum plates for Case (a), The photograph on the upper left is the reconstructed three aluminum plates.

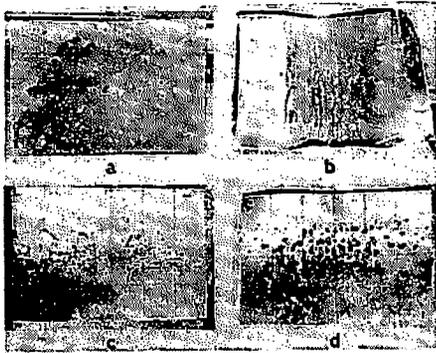


Fig.8 Injuries on aluminum plates for the other cases.

度方向)の延長上に、細く浅いが連なった円環状傷痕がみられるのが特徴である。さらにその円環内周辺に小さい傷がみられる。その成因については後で詳しく議論する。

場合(a)以外の爆発条件で得られたアルミ板の写真をもとめて Fig.8 に示す。Fig.8 では、Fig.7 の写真と異なる傷痕を生じたアルミ板のみを掲げている。Fig.8 a は、場合(a)と同じ爆薬を用い、C面を起爆側(雷管側)に配置した条件でのC面の写真を示している。Fig.7 のC面に現われた円環状傷は、起爆側にも生じること、雷管の破片によると思われる傷が、ほぼその円環内に限られていることがわかる。Fig.8 b は場合(a)の爆薬3個を積重ねた場合のA面の傷痕であり、Fig.7 よりも繊維状傷の密度が高く、しかも起爆側より爆轟方向下側の方が密になっている。この傾向は、すべての条件に共通した現象のようである。しかも起爆側では、繊維状傷痕というよりも、網目状の傷痕になるという特徴がある。場合(b)の写真(Fig.8 b)の傷痕を測ると、A面で132mm、B面で145mmであり、拡がり角に直すと、やはり10~15度の範囲であった。

Fig.8 c は縦のスリットを塩ビパイプに入れた場合(c)の傷痕を示している。スリットに対応する部分は、大きな傷痕が見られず、縦に走る2本の深い溝が繊維状傷を分断している。しかもその傷の少ない部分の幅はスリット幅(1mm)よりかなり広がっている。図には示さないが、小円孔に対応するアルミ板も長円型の傷の少ない領域が見られた。

Fig.8 d は爆発部と塩ビパイプの間に空隙のある場合(d)のA面の傷痕である。この場合には、傷痕が繊維状に連なることはなく、クレータ状の傷が点在している。貫通している所もあり、傷の深さはこの場合が最も大きい。

4. 検討

Fig.4 におけるX線写真には、塩ビパイプがほぼ一様な密度分布で膨張してゆく様子が捉えられている。X線発射遅延時間が $10\mu\text{s}$ のものについては、2度実験をおこない、飛散物分布形状の再現性を確認した。飛散物の運動を定量的に知るため、Fig.4 の写真、あるいは Fig.5 のトレースから飛散物の速度を求めてみた。塩ビ管軸と垂直方向への膨張の x-t 線図を求めたものを Fig.9 に示している。Fig.9 では、塩ビ管壁中央部の横方向運動(図中●印)の他に、飛散物分布の上端(図中△印)および下端(図中○印)の運動も合せて記した。真横への運動も、上、下端の運動も共に、等速度運動をしていることが図よりわかる。このことは爆発ガスによる塩ビ飛散物の加速が、観測した時間よりかなり短時間で終了することを意味している。また、その速度は、管中央部の方が(約 1.6km/s) 上、下端部より(約 1.2km/s) 速く、飛散物は、ある速度分布を持つことがわかる。

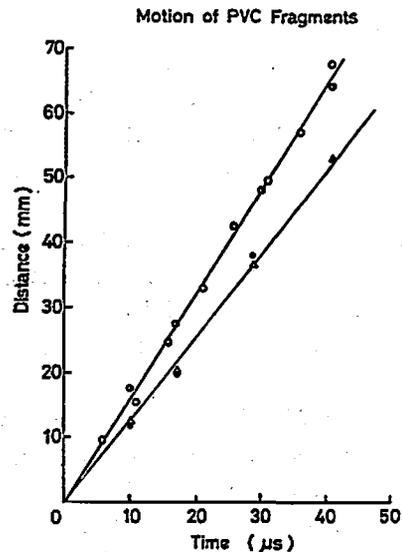


Fig.9 The x-t diagram for the motion of PVC fragments.

塩ビ飛散物の運動と爆発ガスの運動とは、どのように関連しているかをみるのに、Fig.6 の高速度写真のトレースに着目する。Fig.6 で、爆発ガスが下方へ激しく吹出している事実は、塩ビ飛散物が爆発ガスの膨張を拘束していることを意味している。その拘束の程度を知るため、Fig.6 における爆発ガスの横方向への運動も Fig.9 に掲げている(図中○印)、Fig.9 より明らかなように、その運動は、塩ビ飛散物の運動と非常に良く一致する。このことは、飛散物分布の輪郭と爆発ガス膨張先端とが一致すること、換言すれば、爆発ガスは飛散物より前方へ流れ出していないことを意

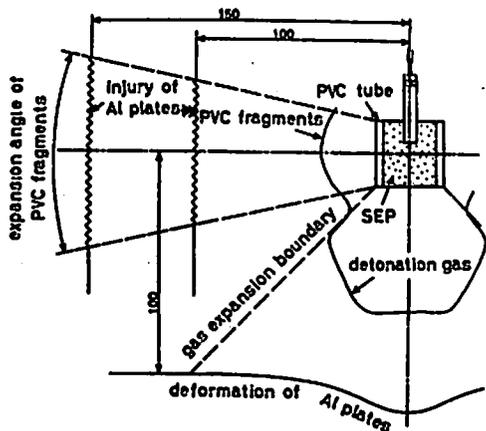


Fig. 10 Combined results for Case (a)

味する。したがって塩ビパイプの拘束は大きく、爆発ガスは殆んど上、下方へ噴出するものと考えられる。下方への爆発ガスの噴出速度は、Fig. 6より求めると約 4km/s となった。

次に、以上の結果とアルミ板損傷との関連をみるために、Fig. 10 に色々な結果をまとめて描いた。塩ビ飛散物によるアルミ板の傷痕幅とX線写真による飛散物膨張角との関連は前に述べた通りである。Fig. 10のC面のアルミ板の変形形状は、得られたアルミ板の代表的なものを形状測定器を用いて調べたもので、へこみのある部分の大きさは、下方へ噴出している爆発ガスの膨張下端の平坦部の幅 (Fig. 10 参照) に近い、そのへこみの大きさは他の爆発条件でもあまり大差なかった。

C面にみられる円環状傷は、下方への爆発ガス膨張角 (約45度) の延長上にあることを前に述べたが、ここでは、その成因について検討してみたい。この円環状傷は、爆発条件によらず、ほぼ同じ位置に観察された。爆発ガスの膨張角に関しては、同様の高速写真撮影を他の爆発条件について試み、やはり約45度であることを確かめた。しかもこの傷はその深さから推定して、かなり微粒子の衝突によって生じたものと考えられる。以上の事実から、その微粒子群は、下方への激しい爆発ガス流に乗って運ばれ、アルミ板と衝突するものと推測される。実際、Fig. 4のX線写真をみると (Fig. 5のトレースにも示したように) 飛散物の分布は、上、下端付近で、その密度に段差がみられるが、完全に途切れているわけではなく、密度はうすいが噴出している部分が確認できる。塩ビパイプの破片

が非常に微粒の場合には、横へは膨張せず、激しい爆発ガスの流れに乗るものと考えられる。しかも、その様な現象がおこるのは、パイプの上、下端付近に限られるものと考えられる。

爆発条件を変えた場合のアルミ板の傷痕で最も特徴的なのは場合 (d) の、爆薬と塩ビパイプの間にギャップを設けた場合である。この場合にはアルミ飛散物は繊維状とならず、粗い粒子状に破壊されているのは明らかである。上述の様な破壊様式の違いは、爆薬の爆薬圧力など、爆薬の特性と、材料の強度などのパイプ物性などに依存して決まるはずである。この条件では、爆薬と塩ビパイプとが離れているので、パイプに作用する圧力はかなり減衰しているものと思われる。作用する圧力の履歴とそれによる材料の破壊のメカニズム、更に物性との関連の解明は難しいが興味ある今後の課題である。

5. 結 言

塩ビ管に爆薬を充填し、爆発させたときの塩ビ管の飛散、爆風の膨張、および周囲に置かれたアルミ板の損傷について調べた。結論を簡単にまとめると次の通りである。

- 1) 塩ビ管は繊維状のほぼ一様な飛散物となり、横方向へ等速で飛散する。
 - 2) 爆発ガスは、塩ビ管飛散物に強く拘束され、飛散物の前方へ流れ出し得ず、下方へ激しく噴出する。
 - 3) 飛散物の一部微粒子群は、爆発ガス流に運ばれ、下方のアルミ板に円環状の傷を生ぜしめる。
- 本実験では、管材質として全て塩ビ管を使用した。が、得られた結果は、用いた爆薬だけでなく、管の物性と大きな関連があると考えられる。管材質を変えた場合、どの様に結果が異なるかの検討は今後の課題として残された。

本研究に際して、熊本大学工学部長、立川教授にはいろいろ助していただきました。実験の遂行にあたっては卒業研究生、小野、田島両君の熱心な協力を得ました。また本研究に使用した爆薬はすべて旭化成より提供を受けました。併せて深甚の謝意を表します。

文 献

- 1) G. I. Taylor : Proc. Roy. Soc., A 201 (1950) 159.
- 2) 大久保 : 工火誌, 32 (1971) 104.
- 3) 吉田ほか3名 : 工火誌, 31 (1970) 319.
- 4) K. Nagayama et al : Jap. J. appl. Phys., 17 (1978) 1713.

Explosion phenomena of explosives confined in pipes

by K. Nagayama*, M. Fujita* and K. Kiyota**

The expansion of blast waves and the produced fragments associated with the explosion of solid explosive, SEP confined in polyvinylchloride (PVC) tubes were investigated by using flash radiography and high-speed photography. Furthermore, the influences of blast waves and the tube fragments on the surroundings were studied by examining the injuries of aluminum plates placed around the explosive charge.

Successive radiographs show that the tube fragments swell almost to the direction perpendicular to the tube axis. Detailed analysis of high-speed photography revealed that the flow of detonation gases is strongly constrained by the tube fragments, i. e. the gases cannot get ahead of the fragments, and the gases burst out downward.

The injuries of aluminum plates show that the tube fragments are fibrous rather than corpuscular. It is striking that the shallow ditch-like injury makes a large circle on the aluminum plates placed perpendicularly to the axis of the explosive charge. It seems very plausible that the tube fragments of fine fiber are carried along very intense downward flow of detonation gases.

(*Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kumamoto; **Yatsushiro Technical College, Yatsushiro)
