

## スラリー爆薬に関する研究（第3報）

### — 先行衝撃波速度とチャンネル効果の関係 —

花崎 紘一\*, 吉田 真\*, 酒井 洋\*\*, 森 伸生\*\*

チャンネル効果による爆速低下や爆轟中断などの異常現象の機構を解明することは、最新の発破技術を更に向上させたり、作業上の安全性を高めたりするために重要なことである。本研究では、抵抗線プローブを用いて爆轟波面の位置と、爆薬と孔壁との空隙を進行する圧気帯の波面の位置を観測し、それらとチャンネル効果による異常現象との関連性の把握を試みた。

その結果、圧気帯の挙動と異常現象に大きな関連性が見られ、圧気帯の定量的な解析がチャンネル効果の機構の究明に欠かすことができないことがわかった。

#### 1. 緒言

近年、鉱山における坑道掘進や採掘およびトンネル工事などの土木工事の発破作業現場においては、爆破効率を高め、適切な発破による掘削を行なうために、発破法の改良や制御発破の適用が盛んに行なわれるようになった。例えば、新しいトンネル工法として注目されている NATM 工法における外周発破孔の発破や、採石場のベンチカットにおける法面発破においては、残すべき岩盤の損傷を極力少なくし、平滑な壁面に仕上げるためにスムースブラッシングが、また工期の短縮やコストの低下を目ざして、長孔装薬による発破が行なわれるようになりつつある。いずれの工法においても、期待すべき効果が十分に得られるかどうかの要因の一つに爆薬の伝爆性の問題が挙げられる。

装薬孔内での伝爆性については、古くからチャンネル効果として定性的にはよく知られており、とくに低爆速の爆薬を用いた長孔装薬の場合にはその効果による爆轟の中断が起りやすいとされている。

最近、従来のダイナマイトに替って、その安全面の優位性からスラリー爆薬系の爆薬が使用される機会が多くなりつつあるが、比較的低爆速であり、被圧下の起爆性や伝爆性に難点があるとされているため、とくにチャンネル効果が大きいと思われる。したがって、チャンネル効果の機構を解明し、その防止策を検討す

るための資料を得ることは重要なことである。

従来からもチャンネル効果による爆轟中断現象の報告や発破孔内での爆速の低下現象に関する研究は多く見られる<sup>1)</sup>。しかし、いずれの研究も爆速のみに重点をおいており、チャンネル効果の原因と考えられている発破孔壁と爆薬との空隙を進行する圧気帯についての研究報告は少なく、その進行速度を実測した研究はほとんど見当たらない。

そこで筆者らは、発破孔内での爆轟中断現象および爆速低下現象等の機構を解明するための資料を得る目的で、圧気帯の進行速度と爆轟波の伝播速度を同時計測し、それらが互いに及ぼす影響と種々の実験条件との関連性についての検討を行なった。

実験条件としては、チャンネル効果に大きな影響を与えると考えられる主な要因、すなわち、爆薬の種類、デカップリング係数（発破孔内径  $d_p$  と薬径  $d_c$  の比で以下  $D_c$  で表す）および発破孔の破壊強度を変化させて実験を行なった。なお、この他に発破孔壁や薬包の面の粗さの大小も無視できないので今後の課題として研究する予定であるが、今回はこの点については触れない。

#### 2. 研究方法

緒言で述べたように、一般にスラリー爆薬はチャンネル効果が大きいと言われているので本研究の試料としては適当である。また、その効果が比較的小さいと言われるダイナマイトを対照試料として用い、両者の測定結果について検討を行なった。試料の諸元を Table 1 に示す。

発破孔としては、爆薬の本来の使用目的である岩盤に穿った装薬孔を用いるのが理想であるが、実験の手

昭和57年4月16日受理

\*京都大学工学部資源工学教室  
〒606 京都市左京区吉田本町  
TEL 075-751-2111

\*\*日本油脂㈱ 武豊工場  
〒470-23 愛知県知多郡武豊町西門 82  
TEL 05697-2-1221

Table 1 Properties of explosives

Explosives	Density (gr/cc)	Temperature (°C)	Diameter (mm)	Length (mm)
No. 2 enoki dynamite	1.30~1.40	25	25	900
Al slurry	1.05~1.15	25	25	900
Al slurry	1.05~1.15	5	25	900

Table 2 Shape of pipes used in experiment

Pipe's name	Inner diameter (mm)	Outer diameter (mm)	Thickness (mm)	Decoupling
VP30	31.8	38	3.1	1.27
VP40	40.2	48	3.6	1.61
VP50	51.8	60	4.1	2.07
VP65	65.8	76	4.1	2.63
VP75	78.0	89	5.5	3.12
S28	27.6	34.0	3.2	1.10
S35	35.7	42.7	3.5	1.43
S42	41.6	48.6	3.5	1.66
S54	52.9	60.5	3.8	2.12
S68	67.9	76.3	4.2	2.72
S82	80.7	89.1	4.2	3.32

軽さと現象の再現性の得易さという点を重視し、今回は1mの長さの配管用炭素鋼管（以後単に鋼管または steel pipe という）、および塩化ビニル樹脂管（以後単に塩ビ管または PVC pipe という）を発破孔と見立てて実験を行なった。なお、JISの品質規定による引張強さから算出したパイプの静的破壊水圧は鋼管が40~80 MPa、塩ビ管が10MPa程度となり、爆轟ガスを封じ込める力の大小の違い、すなわちガスの拘束条件の違いがチャンネル効果に及ぼす影響を把握することができる。今回用いたパイプの寸法および  $D_c$ （爆薬の径を25mmに一定に保ったのでパイプの内径によって定まる）をTable 2に示す。Table 1の爆薬とTable 2のパイプを適宜組合せ実験を行なった。なお、パイプの両端は特に意図した密閉は行わず、輪切りにしたままの状態で砂中に埋め、孔口の一方から電気雷管で起爆した。

3. 測定系統

Fig. 1の概念図は、パイプ内に装薬された爆薬と、抵抗線プローブの配置関係を示している。管壁の天井に設置されているプローブはその外管が外径0.58mm内径0.51mmのアルミニウム管で作られており、充分圧気帯の進行に感応できるものである。一方、管底に設置されているプローブはその外管が外径0.81mm内径

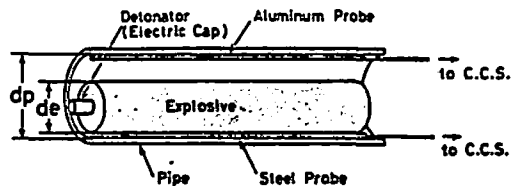
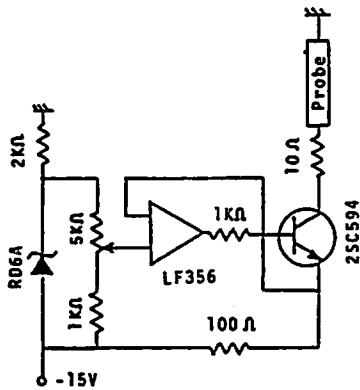


Fig. 1 Cross section of a charged pipe with two resistance probes.

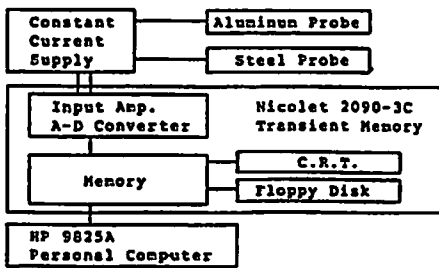
0.5mmのステンレス管で作られており、爆薬の爆轟圧のみに感応することを意図したものである（しかし後述するように実際には高い圧力の圧気帯にも感応した）。

なお抵抗線プローブの作動原理、構造については前報で述べた<sup>2)</sup>ので省略する。

さて、抵抗線プローブからの信号すなわち電圧変化を精度よく記録するための主な条件は、定電流源の安定性が良いこと、および抵抗線プローブを含む計測回路の静電容量が測定系に影響を与えない程度に小さいことである。前者については、今回使用した定電流装置は Fig. 2 (a) に示すように吸い込み型定電流源を用いたもので、この回路に使用しているオペアンプ (LF 356H) の立ち上り特性は  $12V/\mu s$  であり、負荷



(a) Circuit of the constant current supply.



(b) Block diagram of the system.

Fig. 2 Measuring system

が0から300Ωまで変化しても、負荷に流す電流が20mA程度であれば充分早い速度の変化にも応答し、電流の変動はほとんど認められない。今回の実験では抵抗の変化は300Ω以下であり、負荷に流す電流が20mAであれば、Fig. 2 (b)の測定系統図に示すトランジェントメモリ (Nicolet 2090-3c)に充分直接入力することができる。また後者については、2, 3の研究者により、計測回路の時間応答性について理論と実験から検討がなされており<sup>3)</sup>、充分な応答性を得る条件として次式が与えられている<sup>4)</sup>。

$$\frac{l_p}{D} > 8.8 R_p C_e \quad (1)$$

ただし、 $l_p$ はプローブ長(m)、 $D$ は爆速(m/s)、 $R_p$ はプローブの全抵抗(Ω)、 $C_e$ はプローブと定電流装置までのケーブルの静電容量(F)である。今回の測定系では $l_p \approx 0.9\text{m}$ 、 $D = 3000 \sim 6000\text{m/s}$ 、 $R_p \approx 260\Omega$ 、 $C_e \approx 1000\text{pF}$ であり(1)式を充分満足しているのだから精度のよい計測ができたものと思われる。

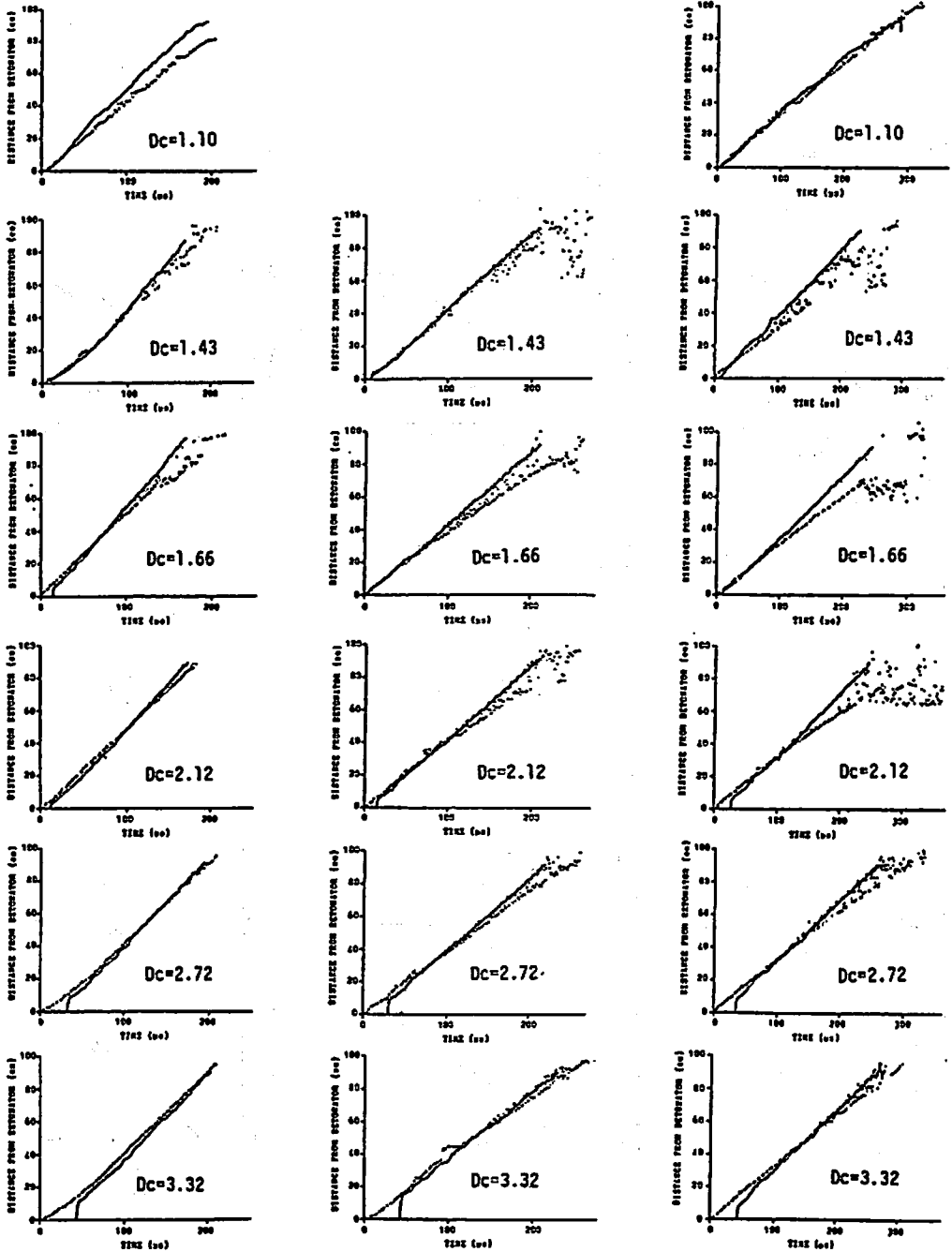
#### 4. 測定結果およびその考察

Fig. 3およびFig. 4はそれぞれ鋼管および塩ビ管を用いた測定の記録である。それぞれの(a)図は2号板

ダイナマイト、(b)図は薬温が25℃のスラリー爆薬、(c)図は5℃のスラリー爆薬の場合で、いずれも上図から下図へデカップリング係数が大きくなる順に並べてある。グラフは、縦軸には抵抗線プローブの出力電圧を起爆点からの距離に換算した値をとり、横軸には電気雷管の起爆時からの経過時間をとってある(c)図のみ他の図とスケールが異なっている)。図中の点線は鋼管または塩ビ管の床部に爆薬と密着させて設置したスチール製プローブの出力波形であり、主に爆轟波の位置を表わしており、実線は管の天井に設置したアルミニウム製プローブの出力波形で圧気帯の到達位置を表わしていると考えられる。

したがって、それぞれの波形の接線の勾配が爆速および圧気帯の進行速度を与えることになる。なお、アルミニウム製プローブの波形(実線)の原点近くでは不連続に立ち上っている場合が、特にDcの大きいときに見られるが、これは起爆直後には爆轟面は管の入り口に近く、爆轟ガスが外部に放出されやすいので管内の圧力上昇が少ないためにプローブが感応せず、ある程度爆轟面が管の内部に進行した状態ではじめて感応しはじめるためである。また、爆轟波面の位置を表わす点線の波形には高周波の振動が現われる場合があるが、その振幅の上側の包絡線がアルミニウム製のプローブからの出力波形(実線)とほぼ一致していることから、この振動は圧気帯によるプローブの管体と芯線とのチャタリング現象に起因するものと考えられ、スチール製プローブは爆轟圧のみでなく、場合によっては圧気帯の圧力にも感応しうるものと考えられる。

さて、以上のことを考慮してFig. 3およびFig. 4を検討してみると圧気帯の進行速度はいずれの場合も爆速よりも大きく、その大きさは爆速に依存していることがわかる。Fig. 5はデカップリング係数と圧気帯速度(実線)および爆速(破線)の平均値の関係を示したものであり、いずれの場合にも前者の方が後者より100m/s~1000m/s速いことを示しており、Dcが1.5~2.0の場合にその差が著しいことがわかる。さらにその差は鋼管の場合(黒印)の方が塩ビ管の場合(白印)よりも大きい。これは爆破孔の破壊強度すなわら爆轟ガスの拘束力が圧力の大きさに影響を与え、ひいては圧気帯速度、爆速に影響を与えるものと考えられる。このことを如実に表わしているのが前述したスチール製プローブからの出力波形に表われている高周波振動である。この振動はFig. 4の塩ビ管の場合よりFig. 3の鋼管の場合に数多く表われており、後者の圧気帯の方が高い圧力をもっていることが知られる。また、両者いずれの場合にもDcが1.43~2.12の場合に振動が



(a) Dynamite

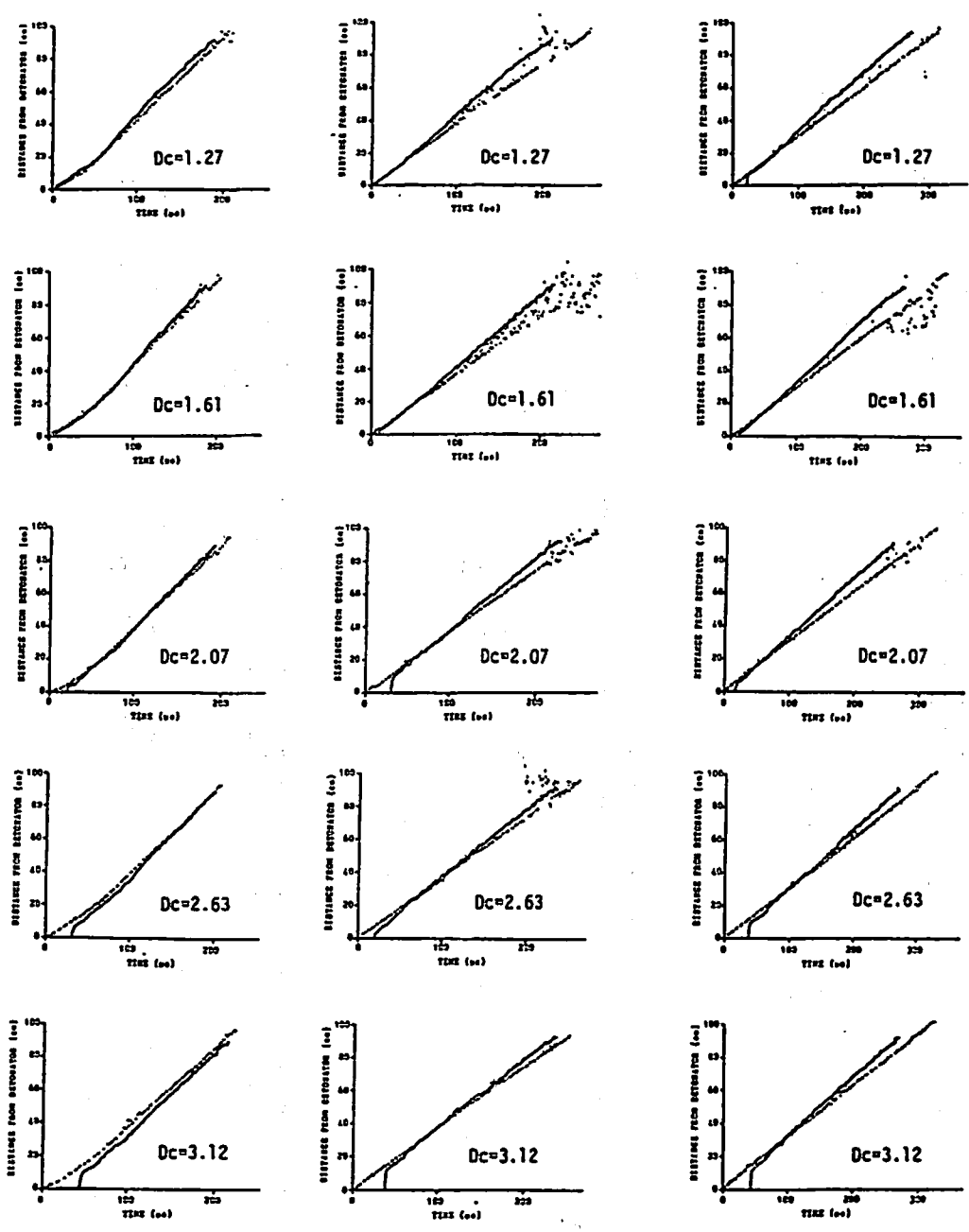
(b) Slurry explosive

(c) Slurry explosive

( 25 °C )

( 5 °C )

Fig. 3 Wave front-time curves for detonation of explosives charged in a steel pipe (solid line ... air front, broken line ... detonation front).



(a) Dynamite

(b) Slurry explosive  
( 25 °C )

(c) Slurry explosive  
( 5 °C )

Fig. 4 Wave front-time curves for detonation of explosives charged in a PVC pipe (solid line... air front, broken line... detonation front).

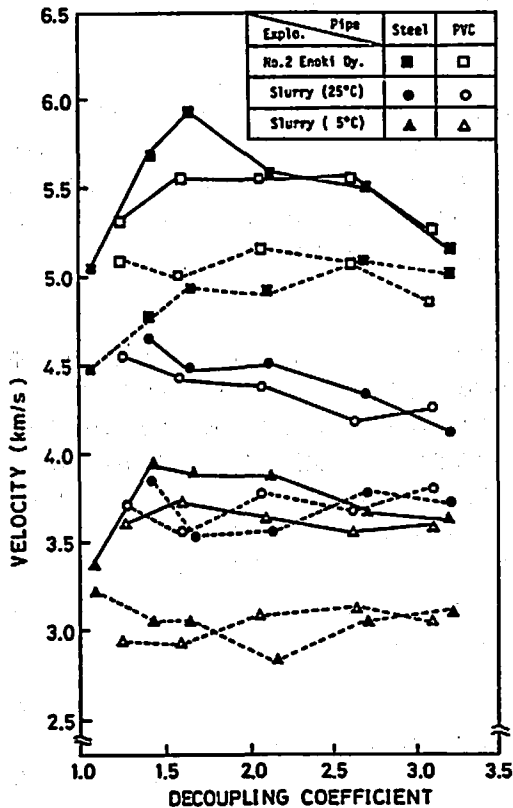
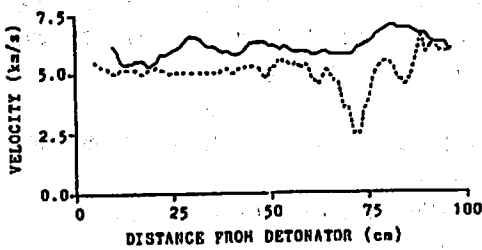


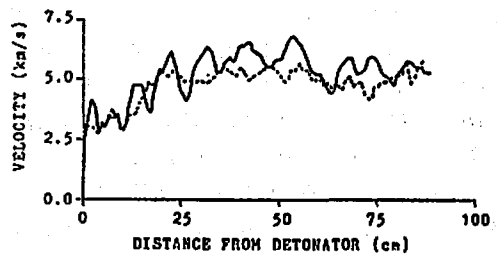
Fig. 5 Effect of decoupling coefficient on air front velocities (solid lines) and detonation velocities (broken lines)

多く現われており、Fig. 6で説明した速度の差が大きくなるDcと一致している。すなわち、圧気帯の圧力と速度差に大きな相関があるといえる。

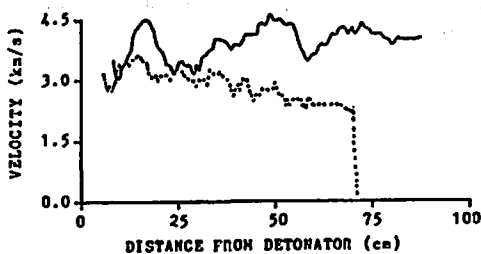
つぎに爆速の低下や爆轟中断などの異常爆轟について検討してみる。Fig. 3およびFig. 4の爆轟面の記録波形(破線)の中で、今回の実験で用いた1 mの爆薬が爆轟する間にそのような異常が生じたと考えられるのはFig. 4では(b), (c)のDc=1.61の場合また、Fig. 3では(a)のDc=1.43, 1.66, (b), (c)のDc=1.43, 1.66および2.12の場合であり、やはり鋼管の場合に爆速の低下が数多く見られる。この関係を如実に表わしている例がFig. 3(a)のDc=1.66とFig. 4(a)のDc=1.61およびFig. 3(c)のDc=2.12とFig. 4(c)のDc=2.07の場合である。これらの出力波形を数値微分して速度を計算し、起爆点からの距離との関係を図に表したのがFig. 6である。(a)および(b)はダイナマイトをそれぞれ鋼管および塩ビ管に装薬した場合であって、いずれもDc=1.6であるにもかかわらず両者の波形に著しい違いが認められる。すなわち前者は起爆点から70cmのあたりで爆速の低下がみられるが後者ではそのような異常はないように思われる。なお起爆点から25cmまでは逆に(b)の塩ビ管の方が低い爆速になっているが、Fig. 3, Fig. 4のダイナマイトの記録を見る限り、また前段の銃撃感度試験の記録を見る限りにおいて、ダイナマイトは起爆直後には低い爆速を呈するのが通常と考えられ、(a)の鋼管の場合



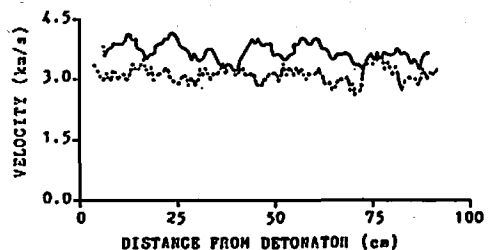
(a) Dynamite, Steel pipe, Dc=1.66



(b) Dynamite, PVC pipe, Dc=1.61



(c) Slurry explosive (5°C), Steel pipe, Dc=2.12



(d) Slurry explosive (5°C), PVC pipe, Dc=2.07

Fig. 6 Velocity profiles of air front (solid line) and detonation (broken line)

のように初めから高い爆速を示しているのはすでに先行衝撃波の影響を受けていると考えられ興味深い。

さらに Fig. 6 (c) および (d) は 5°C のスラリー爆薬について  $Dc \approx 2.1$  の鋼管および塩ビ管の場合であるが、前者はやはり起爆点から 70cm あたりで見掛上爆速が零になっており、少くとも抵抗線プローブを短絡するだけの十分な圧力が得られなかったことを示している。一方後者には大きな異常は認められず、装薬孔の破壊強度との

$$p = \frac{\rho_0 W^2 + P_0 + \sqrt{(\rho_0 W^2 + P_0)^2 + (\gamma + 1)(\gamma - 1) P_0^2}}{\gamma + 1} \quad (2)$$

ただし、 $P_0$  は圧気帯前方の圧力で 0.1 MPa、 $\rho_0$  はその密度で 1.245 kg/m<sup>3</sup>、 $\gamma$  は比熱比で 1.4 をそれぞれ代入し、 $W$  は圧気帯の進行速度で実験結果を用いて計算した。その結果、ダイナマイトの場合で 26~35 MPa、スラリー爆薬では 17~21 MPa (25°C)、11~16 MPa (5°C) であり、いずれも、2 節で述べた塩ビ管の静的破壊水圧よりは大きいが鉄管のそれよりは小さく、拘束力の影響を吟味する上で興味深い。

さて、以上の推察から圧気帯が爆轟波面を超越した場合、装薬孔内の未反応部分（爆轟波面より前の部分）の爆薬が高圧の圧気帯にさらされることになり、その部分の爆薬の伝爆性が損われることが容易に想像され、その度合は圧気帯のもつ圧力の大きさとそれにさらされている時間の長さに関係するものと考えられる。圧力は (2) 式のように圧気帯の速度から計算できるので、Fig. 3 や Fig. 4 の実線の勾配から、また受圧時間は同図の実線と破線の横座標の差から求めることができる。すなわち、実線の勾配が大きく破線との横座標の差が大きくなれば伝爆性に異常が現われる可能性が強いことになる。このように考えれば、Fig. 3 (c) の  $Dc = 1.43 \sim 2.12$  や同図 (a) の  $Dc = 1.66$  の場合に異常が顕著に現われていることが理解できる。

したがって、これらの場合以外の条件においても、薬長がもっと長い実験を行えば爆轟の異常が現われるであろうことは、Fig. 3 や Fig. 4 の結果から容易に推測される。

## 5. 結 言

本研究の結果、圧気帯の挙動とチャンネル効果による爆轟の異常現象との間には大きな相関性が見られる

相関性の大きいことを示唆している。

以上に述べた考察により圧気帯のもつ圧力の大きさがチャンネル効果の大きな要因の一つであると推察されるので、次のような仮定のもとにその値を試算してみる。すなわち、圧気帯は垂直衝撃波を形成しているものとみなし、空気を polytropic な気体と仮定し、衝撃波面の前後の諸量の保存則等から求めた次式を用いて圧気帯の圧力  $p$  を推定できる。

ことがわかった。したがって、発破条件と圧気帯の形成の関係および、圧気帯の存在と爆薬の伝爆性の関係が明らかになれば発破法の改良や新しい火薬の開発に有用なデータを提供するものと思われる。ちなみに今回の実験では、装薬孔の破壊強度およびデカップリング係数の違いにより圧気帯の挙動が大きく変わることがわかる。さらに、圧気帯が伝爆性に与える影響は爆薬の種類によって異なるが、圧気帯に加圧される時間とその圧力の大きさに大きく左右されることがわかる。

したがって、今後さらに圧気帯の進行速度のみならず圧力値の実測なども含め、より長い装薬についての実験を数多く行ない、その生成機構の理論的解析のためのデータを集める必要がある。一方、圧気帯にさらされる爆薬の伝爆性についての研究、さらにそれに耐えうる爆薬の開発などが、スムーズプラスチックや長装薬発破に代表される発破技術の発展や作業の保安面における向上などに寄与するものと考えられる。

本研究の一部は昭和 57 年度（第 11 回）火薬工業技術奨励会の研究助成金を受けて行なったものである。

## 文 献

- 1) 中野雅司, 森伸生, 工業火薬協会誌, 40, 291, (1979)
- 2) 花崎敏一, 酒井洋, 工業火薬協会誌, 42, 208, (1981)
- 3) 佐々宏一, G. Larocque, 工業火薬協会誌, 27, 223, (1966)
- 4) 黒田英司, 日下部正夫, 工業火薬協会誌, 37, 8 (1976)

**Studies on Slurry Explosives (III)**  
**Relation between the Air Shock Velocity and Channel Effect\***

by Koichi HANASAKI\*\*, Makoto YOSHIDA\*\*,  
Hiroshi SAKAI\*\*\* and Nobuo MORI\*\*\*

The opportunities that slurry explosives are used in rock blasting are increasing at mines, quarries or tunnel excavation sites, and then, to improve the technique and also the safety operation, it is important to clarify the mechanism of the channel effect on detonatability of explosives charged in a bore hole.

As a fundamental study on the mechanism, the authors tried to measure the detonation velocity of the explosive charged in a steel pipe or polyvinyl chloride pipe, and also to measure simultaneously the velocity of the compressed air front moving through the channel which is formed between the inner wall of the pipe and the explosive.

From the results obtained they confirmed that the channel effect depends remarkably on difference in velocities between the detonation front and the compressed air front as well as on the amount of pressure at the compressed air.

(\*Supported financially in part by the Foundation for the Promotion of the Industrial Explosives Technology.

\*\*Department of Mineral Science and Technology, Kyoto University,  
Kyoto, Japan.

\*\*\*Taketoyo Plant, Nippon Oil and Fats Co., Ltd., Aichi, Japan.)

---