



含水爆薬の力学的性質に関する研究（第2報）

—含水爆薬内を伝播する圧力波の距離減衰—

鈴木明人*, 田中 満*, 青木章哲**, 安部隆幸**

小川輝繁***, 福山郁生***

含水爆薬内を伝播する圧力波の減衰特性を確認するために、モデル銃の弾丸による衝撃と、電気雷管を起爆させた衝撃とを模擬含水爆薬に与えて距離減衰をもとめた。この含水爆薬試料では、化学発泡剤の量と、GMBの量とがそれぞれ変えられており、密度が変化した試料となっている。

化学発泡剤を含む試料では、弾丸が衝突した時の小さい衝撃的圧力を受けた場合、および電気雷管が起爆した時の大きい衝撃を受けた場合ともに、その内部を伝播する圧力波の減衰は空気量の多少に比例し、空気量が多いほど、圧力減衰が大きい。

GMBを含む試料では、GMBが破壊されるような大きい衝撃が加わった場合には、圧力によりGMBが破壊されるために衝撃吸収力が大きくなり、圧力波の減衰が大きくなる。しかし、小さな圧力が加わった場合には、試料内に含まれるGMB量に比例した圧力減衰をする。

含水爆薬中の気泡成分を化学発泡剤とGMBとに分けて試験した結果、含有物の違いにより内部を伝播する圧力波の様相が異なることが明らかになった。

1. 緒言

発破技術の進歩につれ、大口径の穿孔が行なわれるようになり、一孔当りの装薬量も増加してきている。このように装薬量が増えると、段発発破時に隣接孔に作用する圧力も大きくなり、ウォーターゲルタイプの含水爆薬を使用すると不発残留することがある。

ウォーターゲルタイプの含水爆薬は、一般に軟らかく、弾力性が有り、内部に含まれる気泡成分の量と種類によって爆轟時の性質が変化し、また、爆薬自体の物性も変化している¹⁾。

本論文において述べた一連の研究は、ウォーターゲルタイプの含水爆薬の力学的性質ならびに外力を受けた場合の圧力伝播特性および体積変化特性等を求め、衝撃波が入射した場合の爆薬の特性を明らかにし不発

残留現象を解明することを目的として行ったものである。

本研究では、含水爆薬内を伝播する圧力波の距離減衰を求め、含水爆薬内を伝播する圧力波が、含水爆薬内の気泡成分の量と種類により異なることを実験的に確認した。

実験は、模擬含水爆薬に、小さな衝撃的圧力と、大きな衝撃圧力を作用させて行った。

2. 弾丸が衝突した時の圧力波の伝播実験

電気雷管を装着した含水爆薬に外部より衝撃が加わった時、衝撃は圧力波として爆薬内を伝播し、電気雷管に達する。爆薬内を圧力波は減衰しながら伝播するが、その減衰の特性は材質によって変化すると考えられるし、また、加わる衝撃の大きさによっても変化すると考えられる。ここでは、まず小さな衝撃的圧力が加わった場合の実験としてモデル銃の弾丸を衝突させた場合の圧力波の減衰を求める。

2.1 試料

実験に使用する模擬含水爆薬は硝安等の酸化剤濃厚溶液にガムを添加して架橋させたゲルを基剤として、これに化学発泡剤を添加してガスバブルを発生含有させたもの、あるいは、ガラスマイクロバルン（以下、GMBと略す）のB種とC種を別個に添加した試料で

昭和59年10月29日受理

*大成建設技術研究所
〒245 横浜市戸塚区名瀬町 344-1
TEL 045-812-1211

**日本カーリット保土ヶ谷工場
〒240 横浜市保土ヶ谷区仏向町 1625
TEL 045-331-3041

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

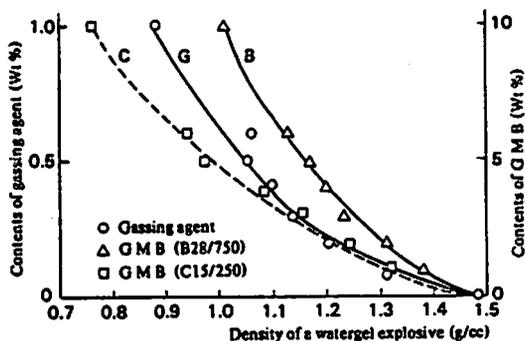


Fig. 1 Density of the watergel explosive sample vs. contents of gassing or GMB (wt %)

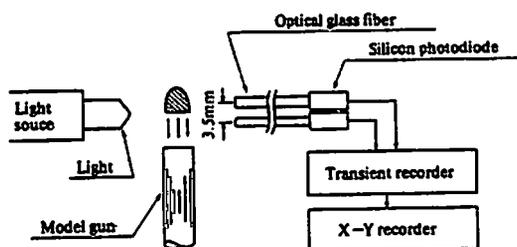


Fig. 2 Measuring system for bullet velocity

ある。

試料の配合は、主成分である酸化剤溶液が約90%、気泡剤である化学発泡剤または、GMBが0~10%、その他成分が約5%である。

実験に使用した試料は、あらかじめ化学発泡剤の添加量または、GMBの添加量を変化させて密度を変えている。Fig. 1に試料の密度と添加量の関係を示した。

Fig. 1の横軸は、密度を示しており、左側の縦軸は、化学発泡剤の添加量を、右側の縦軸はGMBの添加量を重量パーセントで示している。無添加の基剤の密度は1.46~1.48であり、気泡剤の添加量が少ない時は密度の変化が大きい。

2.2 実験方法

2.2.1 モデル銃の弾速測定

実験では厚さを変化させた試料にモデル銃の弾丸を衝突させて、この弾丸の衝突によって生じた圧力波を試料の反対側で加速度として測定している。モデル銃は空気圧によって弾丸を発射する。まず試料に作用する外力を求めるためにモデル銃の弾丸速度を測定した。

弾丸速度測定には光を利用しており、Fig. 2に示す装置を使用した。測定時にはFig. 2の左側に示すペンライトの光源より光を照射し、右側の間隔3.5mmの2本の光ファイバーケーブルを通してシリコンフォト

セルに受光させる。

Fig. 3に得られた記録の一例を示す。図中の出力1は弾丸が最初に通過した時の記録であり、出力2は次の記録である。出力1と出力2の波形が低下する時間差を弾丸の通過時間として、光ファイバーの間隔を除くことにより、弾速を求める。弾速計算には平均値を採用した。

2.2.2 モデル銃弾丸の衝突による圧力波の距離減衰測定

含水爆薬内で圧力は減衰しながら伝播していくが、この減衰状況は爆薬の性質によって異なる。実験試料として、無添加の基剤1種類に、略号でGと示した化学発泡剤添加試料3種類、略号でBまたはCと示したGMB添加試料各々3種類の計10種類を用意した。

試料の厚さは20mm、40mm、60mm、100mmの4種類である。

これらの試料を、中心に円孔がある台上に置き、試料の中央上部に加速度計を設置する。モデル銃を台の下部に固定し、弾丸が台座の円孔中心を通るようにし、さらに、モデル銃の銃口と試料との間隔は弾速が一定になるように10mmに固定した。Fig. 4は実験状況を示す模式図である。

試料に入射する加速度と通過後の加速度を直接同時

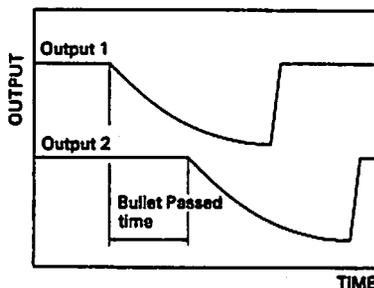


Fig. 3 An example of wave form observed by two photodiodes for bullet velocity measurement

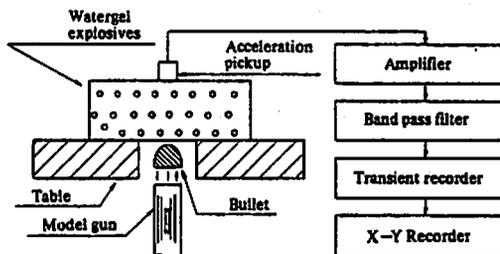


Fig. 4 Measuring system for bullet shock attenuation

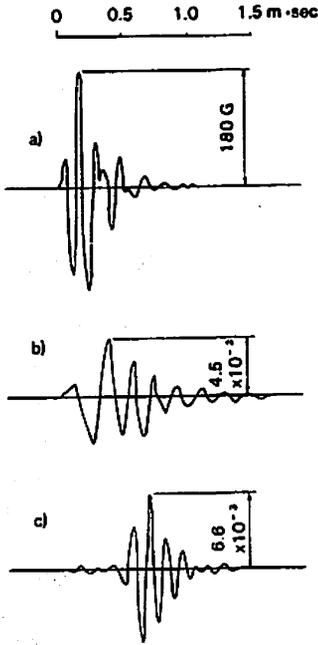


Fig. 5 Examples of acceleration wave form by bullet of model gun
 a) Direct hit to pickup
 b) Base material $t=58\text{mm}$
 c) GMB $c=3\%$ $t=93\text{mm}$

に測定することが困難なため入射時の加速度としては弾丸を直接加速度計に衝突させて求めている。そしてこの時の加速度を基準加速度としている。試料を通過後の加速度は、リオン NA-20 の騒音計より $6\text{kHz} \sim 10\text{kHz}$ のバンドパスフィルターを通して Nicolet Model 4094 のトランジェットレコーダーに記録して X-Y レコーダーで図化した。

2.3 実験結果

2.3.1 モデル銃の弾速測定結果

弾速測定は A, B 2 種類の弾丸について行った。弾丸重量は A で 0.36g , B で 0.39g である。

これら 2 種類の弾丸の平均速度 V と速度のバラツキを示す標準偏差 σ_{n-1} は次のようになる。

弾丸 A $V_A = 25.1 (\text{m/sec})$, $\sigma_{n-1} = 5.57 (\text{m/sec})$

弾丸 B $V_B = 30.4 (\text{m/sec})$, $\sigma_{n-1} = 3.99 (\text{m/sec})$

また、これら弾丸の衝突直前の平均運動エネルギー E は、

弾丸 A $E_A = 1.13 \times 10^{-1} (\text{Joule})$

弾丸 B $E_B = 1.80 \times 10^{-1} (\text{Joule})$

となる。

2.3.2 試料を伝播した圧力波の測定結果

モデル銃の弾丸が試料に衝突し、試料内を通過した

Table 1 Observed acceleration value by bullet shock

Sample	Base	Gassing agent			GMB B 28 / 750			GMB C 15 / 250		
		$G_{0.1}$	$G_{0.5}$	$G_{1.0}$	B_1	B_b	B_{10}	C_1	C_b	C_{10}
$R \approx 20\text{mm}$ Acceleration (G)	6.2	5.9×10^{-1}	8.9×10^{-1}	4.8×10^{-1}	4.6	7.6	4.5	3.9	3.8	20.5
$R \approx 40\text{mm}$ Acceleration (G)	3.9×10^{-1}	3.2×10^{-1}	3.5×10^{-3}	2.1×10^{-3}	1.5	8.6×10^{-1}	2.6	4.9×10^{-1}	1.6	2.6
$R \approx 60\text{mm}$ Acceleration (G)	—	2.7×10^{-3}	3.7×10^{-3}	8.8×10^{-3}	2.2×10^{-1}	1.9×10^{-3}	1.6	1.2×10^{-1}	6.6×10^{-1}	1.3
$R \approx 100\text{mm}$ Acceleration (G)	1.6×10^{-3}	3.5×10^{-3}	3.4×10^{-3}	2.8×10^{-3}	1.3×10^{-3}	2.8×10^{-3}	6.7×10^{-1}	1.6×10^{-3}	3.5×10^{-1}	3.2×10^{-1}

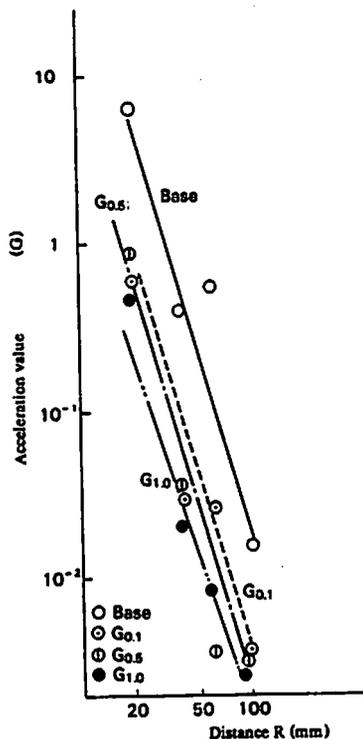


Fig. 6 Acceleration caused by bullet shock through dummy watergel explosives with gassing agent vs. distance

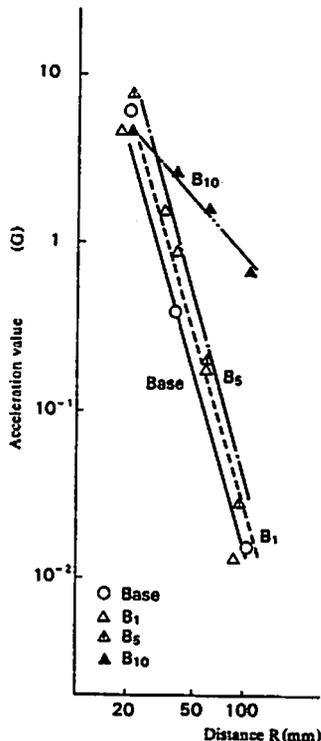


Fig. 7 Acceleration caused by bullet shock through dummy watergel explosives with GM-B B vs. distance

後の加速度出力波形例を Fig. 5 に示す。Fig. 5 の a) 図は弾丸を直接加速度計に衝突させた時の加速度波形を示している。b) 図は無添加の基剤で試料厚が58mm の場合の加速度波形であり、c) 図は GMB の C が 3% 添加された試料で厚さ 93mm の場合の加速度波形を示している。

Table 1 に測定した最大加速度の平均値を示した。

2.3.3 含水爆薬内の圧力伝播

最大加速度と距離、すなわち、試料厚さとの関係を検討するために、Table 1 の加速度 α を縦軸にとって、距離 R を mm 単位で示して、両対数グラフに示したものが Fig. 6, 7, 8 である。Fig. 6 は基剤と化学発泡剤を含む試料について示しており、Fig. 7 は GMB-B を含む試料について加速度 α と距離 R の関係を示している。Fig. 8 は GMB-C を含む試料について、Fig. 6, 7 と同様の関係を示している。このように両対数紙上に測定結果をプロットすると加速度 α と距離 R との間には、次の式が成立することがわかる。

$$\alpha = AR^{-B}$$

ここで、 α は加速度を示し、 R は距離 (mm)、 A 、 B は実験定数である。

各試料毎に、最小二乗法を用いて定数 A 、 B を求め、相関係数と共に表示すると、Table 2 となる。

Fig. 6 では、化学発泡剤の添加量が多くなると加速度が低下すること、および、それぞれの添加量での減衰の度合いがほぼ同じことがわかる。

一方、Fig. 7, 8 においては基剤に比較して、GMB を含む試料の加速度はいづれも大きくなっており、GMB を含む試料では、GMB の量が多くなるに従い圧力波の距離減衰が小さくなる傾向にあり、化学発泡剤を含む試料と逆の性質を持つことが明らかになった。

3. 電気雷管による衝撃圧の減衰測定

モデル銃の弾丸が試料に衝突した場合には小さな衝撃的圧力しか試料に作用しない、しかし、大きな衝撃が試料に作用した場合には小さな衝撃的圧力が作用した場合は試料内を伝播する圧力が異なると予測されたので、6号電気雷管を試料内部で起爆させ、試料内を伝播する圧力波の距離減衰を求めた。

3.1 試料および実験方法

試料として、モデル銃の弾丸を衝突させた実験に使用した気泡剤を無添加の基剤と化学発泡剤を 0.2%、0.4% 含む試料および GMB-C を 3% 含む試料を準備

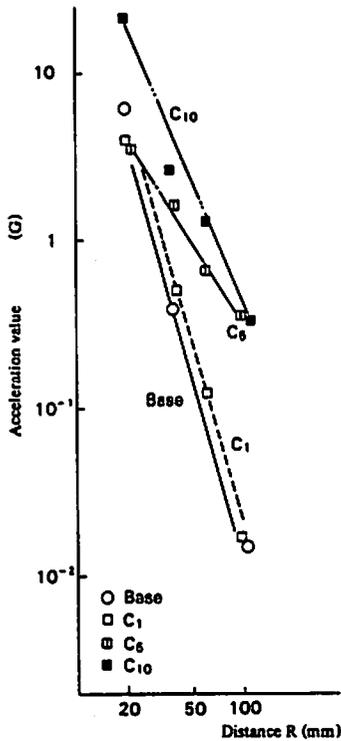


Fig. 8 Acceleration caused by bullet shock through dummy watergel explosives with GMB C vs. distance

した。

試料を直方体（縦 30.5cm × 横 18.5cm × 高さ 10cm）に切断し、この中に 6 号電気雷管を埋め込み、この電気雷管より距離 R を隔ててトルマリンゲージの圧力計

を設置した。Fig. 9 は実験の状況を模式的に示している。実験時にはトルマリンゲージで圧力波を電気信号に変えトランジェントレコーダーを介して X-Y レコーダーに記録している。

電気雷管からトルマリンゲージまでの距離は起爆時に電気雷管の破片等で圧力計を破損しないように最小 60mm とした。したがって、距離 R は 60mm から最大 250mm となる。

本実験では、比較のために同一試料を用いて図-4 おいて述べたと同様のモデル銃の弾丸による圧力波の伝播測定を行った。

3.2 実験結果

6 号電気雷管を起爆させた時に、含水爆薬内を伝播した衝撃圧波形の例を Fig. 10 に示す。Fig. 10 の a) 図は基剤で、距離 $R=60\text{mm}$ での圧力波である。b) 図は同一試料で、距離 $R=150\text{mm}$ での圧力波であるが減衰が激しい。c) 図は化学発泡剤添加量 0.4% の試料で、距離 $R=60\text{mm}$ での圧力波である。最高圧力は a) 図に比較して 10 分の 1 以下になっている。d) 図は同一試料で、距離 $R=150\text{mm}$ での圧力波である。e) 図は GMB-C が 3% 添加された試料で、距離 $R=60\text{mm}$ での圧力波であり、f) 図は同一試料で、距離 $R=150\text{mm}$ での圧力波を示している。

各試料についてそれぞれ距離を変えて測定した平均ピーク圧力と距離の関係を検討するために、ピーク圧力を縦軸にし、距離を横軸に記して、両対数グラフに示したものが Fig. 11 である。さらに、Fig. 11 には同一試料がモデル銃の弾丸の衝撃を受けた場合の応力と距離の関係も示した。Fig. 11 の上部の各実験曲線は

Table 2 Calculated constants and correlative coefficients of distance attenuation formulas

Sample	A	B	Correlative coefficient
Base	9.1×10^4	4.4	-0.96
$G_{0.1}$	4.4×10^4	4.6	-0.98
$G_{0.5}$	1.8×10^4	4.7	-0.98
$G_{1.0}$	2.5×10^3	4.2	-0.99
B_1	5.7×10^4	4.3	-0.97
B_5	1.2×10^6	5.2	-0.95
B_{10}	1.1×10^2	2.2	-0.99
C_1	9.7×10^4	4.5	-0.99
C_5	2.6×10^2	2.6	-0.99
C_{10}	1.1×10^4	3.4	-0.99

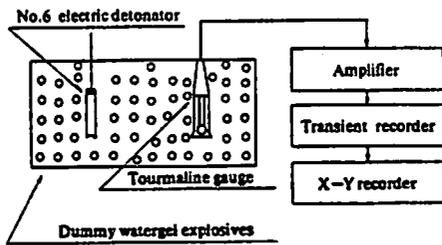


Fig. 9 Measuring system for No. 6 electric detonator shock attenuation

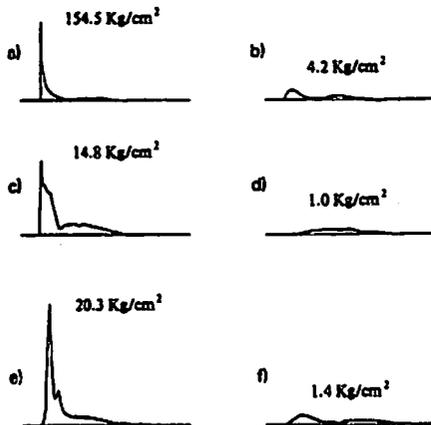


Fig. 10 Examples of pressure wave form by No. 6 electric detonator
 a) Base material $R=60\text{mm}$
 b) Base material $R=150\text{mm}$
 c) Gassing agent 0.4% $R=60\text{mm}$
 d) Gassing agent 0.4% $R=150\text{mm}$
 e) GMB $C=3\%$ $R=60\text{mm}$
 f) GMB $C=3\%$ $R=150\text{mm}$

6号電気雷管による圧力値を示しており、下部の各実験曲線はモデル銃の弾丸が衝突した場合の応力値を示している。

6号電気雷管の起爆により試料を伝播する圧力と距離の関係式、およびモデル銃の弾丸の衝突により試料

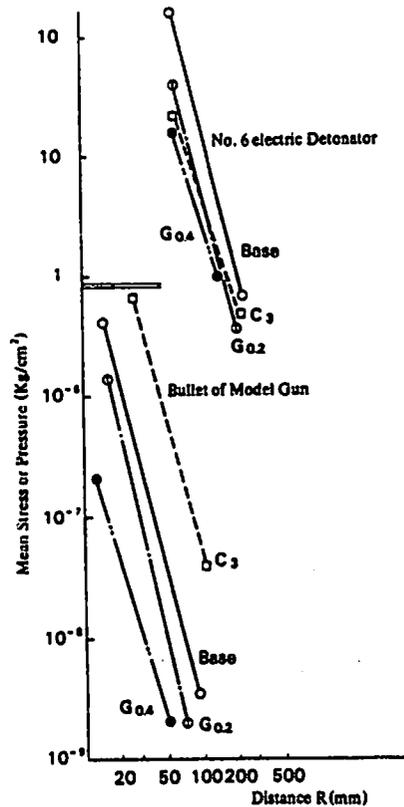


Fig. 11 Mean stress or pressure vs. distance

を伝播する応力と距離の関係式を

$$P = CR^{-d} \quad (2)$$

ここに C, d は定数

と仮定して最少二乗法で計算し各定数と相関係数を求め Table 3 に示した。

4. 考察

含水爆薬の圧力伝播特性を確認するために、2種類の実験を行ったが、この実験で大きく異なっているのは外力の大きさであり、モデル銃の弾丸が衝突する場合のエネルギーは $1.13 \sim 1.8 \times 10^{-1}$ Joule である。一方、6号電気雷管のエネルギーは田中克己²⁾等によ

Table 3 Index constants and correlative coefficient of distance attenuation formulas

Sample	Shock by No. 6 Electric detonator			Bullet shocks of model gun		
	c	d	Correlative coefficient	c	d	Correlative coefficient
Base	7.3×10^8	3.8	-0.97	3.7×10^{-3}	3.6	-0.99
G _{0.2}	6.1×10^7	3.5	-0.95	2.6×10^{-3}	3.9	-0.98
G _{0.4}	3.9×10^6	3.0	-0.96	2.7×10^{-4}	3.0	-0.96
C _{1.0}	2.4×10^6	2.9	-0.93	3.8×10^{-1}	3.5	-0.99

て、約540calと測定されている。従って2.3KJoule程度となり雷管表面積を考慮しても、モデル銃の弾丸が衝突した力に比較してはるかに大きい。

従って小さなエネルギーが作用した場合と大きなエネルギーが作用した場合とに区別して考えて良い。

4.1 モデル銃の弾丸が衝突した時の距離減衰

一般に、材料の気泡含有率が多くなるに従い衝撃等が加わった時の圧力の吸収が大きくなる、すなわち波動の距離減衰は大きくなるものと考えられており、Fig. 6に示した化学発泡剤を含む試料では同様の傾向が認められた。しかし、GMBを含む試料では気泡量が大きくなり密度が低下してもFig. 7.8に示すように距離減衰は気泡を含まない基剤よりも少ないという結果が得られている。GMBはガラス質であるため、GMBのガラス球が固体として働く時の圧力伝播性能が優れているために圧力の吸収が少ないと考えることができる。この現象は弾性波の伝播速度がGMBの量が増加するに従い速くなっていることから推定される³⁾。

次に加速度の距離減衰はGMB-B10%含有試料およびGMB-Cを5%以上含有する試料では、かなり小さくなっている。GMBの体積パーセント濃度Vol%はB-5%で約25Vol%，B-10%で約38Vol%，C-5%で約35Vol%，そしてC-10%で約53Vol%となっている。GMBの体積パーセント濃度が25Vol%程度までの試料ではGMBの影響はそれほど現れず、加速度および距離減衰特性ともに基剤とほぼ同様の傾向を示すが、この体積パーセントが35%程度とかなり高くなるとGMBの影響が大きくなり、加速度および距離減衰特性に差が出るものと考えられる。

4.2 電気雷管の起爆による衝撃の伝播

6号電気雷管を起爆させた場合の衝撃圧の最高圧力の距離減衰については、Fig. 11の上部に示した。衝撃が伝播し易いのは基剤であり、モデル銃の弾丸衝突の場合には最大衝撃を伝達していたGMBを添加された試料の最高圧力も化学発泡剤を添加されたものと同じ程度まで小さくなっている。

この理由としては、GMBが電気雷管の衝撃により破壊され普通の気泡と同じように衝撃を吸収するためと考えることができる。Fig. 11の上部と下部の図における実線で示された基剤と点線で示されたC3を比較するとこの現象が良く説明されている。

次にTable 3に示した減衰指数 d を電気雷管の実験と弾丸衝突の場合とで比較すると、GMB-C3%含有試料を除きほぼ同等の値を示している。GMB-C3%含有試料では距離減衰指数が2.9から3.5と大きく変っているが、この理由として、弾丸衝突では破壊されなかったGMBが6号電気雷管による衝撃では破壊さ

れ、特に爆源に近い部分ほど高い圧力を受け、GMBの破壊される割合も大きくなり、それに伴い吸収される圧力の割合も大きくなるので、爆源に近い部分の最高圧力が低く押えられて距離減衰指数が小さくなったものと考えられる。

4.3 電気雷管を起爆させたときのインパルスおよびエネルギー密度

これまで最高圧力について検討したが、圧力の作用時間を考慮したインパルスおよびエネルギー密度を求めるとインパルスおよびエネルギー密度ともに爆源からの距離と対数比例関係で低減している。インパルスは基剤で $I_0 = 5.72 \times 10^2 R^{-2.7}$ であり、化学発泡剤0.2%含有試料では $I_{0.2} = 5.03 R^{-1.7}$ 、化学発泡剤0.4%含有試料では $I_{0.4} = 3.37 \times 10^{-1} R^{-1.2}$ であり、GMB-C3%含有試料では $I_{C3} = 9.31 R^{-1.0}$ となる。ここで I は (kg・秒/cm²) であり R は (mm) 単位で示している。

このように、インパルスは距離 R が100mm以上になると基剤では急激に小さくなり、気泡含有試料より低減する。

エネルギー密度ではこのような特徴は認められない。

インパルスにおいて距離 R が100mm以上になると最高圧力の距離減衰と逆の傾向が生じた原因としては気泡含有試料の圧力作用時間が長くなったためと考えられるが、この理由として気泡含有試料では波動が伝播時に、内部気泡によって乱反射を繰り返すために初動が試料内を通過後も持続時間が長くなるものと考えられることができる。

この現象に関しては追加研究を行う予定である。

5. 結 言

小さい衝撃的圧力を受けた試料内の圧力伝播と大きい衝撃を受けた試料内の圧力伝播測定を行い、ウォーターゲルタイプの含水爆薬がその中に含む気泡量および気泡の種類によって異なる圧力伝播をすることを確認した。

化学発泡剤を含む試料では、小さい衝撃的圧力を受けた場合も大きい衝撃圧を受けた場合にも同様の距離減衰を行い、減衰率は気泡量が多いほど大きい。GMBが添加された試料では、加わる圧力が小さい場合にはGMB添加量が多いほど波動は伝播しやすい。一方大きい衝撃が加わった時にはGMBは破壊され、内部気泡が圧力吸収作用を行い圧力の減衰は大きくなる。この圧力減衰率は化学発泡剤を含む試料と気泡量が同じならば同じものと推定される。

このように化学発泡剤が添加された試料とGMBが添加された試料では外部より衝撃的な圧力を受けた時に異なる挙動をすることが明らかとなった。

本研究に当って日本カーリット木村増氏、大成建設近藤昭二氏、鶴原 劭氏の御協力をいただいたことを感謝する。また実験では横浜国立大学生、色部厚、水野敬三、三浦寿人君の協力を得た。

本研究の一部は、火薬工業技術奨励会の研究助成金を受けて行ったものである。ここに記して厚く感謝の意を表する。

文 献

- 1) 竹内文雄(他);工火誌 Vol. 43 No. 5 (1982)
P 285
- 2) 田中克己(他);工火誌 Vol. 42 No. 4 (1981)
P 239
- 3) 宵木章哲(他);工火誌投稿中「含水爆薬の力学的性質に関する研究(Ⅰ)」

Experimental Studies on Dynamic Properties of Water-gel Explosives. (II)

Shock Wave Attenuation in Water-gel Explosives

by Aketo SUZUKI*, Mitsuru TANAKA* , Akinori AOKI*
Takayuki ABE* , Terushige OGAWA***, Ikuo FUKUYAMA***

In an attempt to identify the attenuation property of the pressure wave propagating through a water-gel explosive the authors applied a shock caused by a model gun bullet or a shock caused by initiating an electric detonator to a dummy water-gel explosive. The water-gel explosive test specimens were prepared with varied contents of gassing agent or glass micro balloons causing the resultant differences in density.

On the test specimen containing a gassing agent, when either a light shock generated by the collision of a bullet or a heavy shock generated by the detonation of an electric detonator is applied, the attenuation of the pressure wave is in proportion to the air quantity, i. e. the larger the air quantity, the larger is the pressure attenuation.

On the test specimen containing glass micro balloons, when a heavy shock enough to make the glass micro balloons collapse is applied, increases shock absorption property. On the other hand, when a light pressure is applied, pressure attenuation is in proportion to the glass micro balloon content.

From results of the test, it has become clear that the behavior of pressure propagating in the explosive depends on what material is contained as gas bubbles in it.

(*Taisei Corporation Technical Research Institute, Nasemachi 344-1
Totsuka-ku Yokohama

**The Japan Carlit Co., Ltd. Hodogaya Plant, Bukko cho 1625
Hodogaya-ku Yokohama

***Yokohama National University, Tokiwadai 156 Hodogaya-ku Yokohama)