

含水爆薬の力学的性質に関する研究（第1報）

—含水爆薬の静的な力学的特性値—

青木章哲*, 安部隆幸*, 田中 満**, 鈴木明人**
 福山郁生***, 小川輝繁***

ウォーターゲルタイプの含水爆薬の不発残留現象の解明を目的として、単純な1質点、ばね-ダッシュポット系の振動モデルを仮定して、添加する気泡剤の種類、量を変えた模擬薬について、剛性率、減衰定数、弾性波速度等の静的な力学的特性値をその自由振動波形から振動理論を適用して求めた。

ガスバブルを含有する場合には、その量が多くなるのに従い含水爆薬の剛性率、減衰定数、弾性波速度は低下するが、GMBを含有する場合には、いずれも著しく増加し、含有する気泡成分によってその物性が顕著に変化して、衝撃的な圧力が加わった場合の応答挙動に大きな相違があることが予想される。

1. 緒言

ウォーターゲルタイプの含水爆薬では、発破時、隣接孔から発生する衝撃波等により、不発残留現象が多く発生した¹⁾²⁾。ほとんどの場合起爆用の電気留管が圧縮変形してその起爆力を失っている。これはウォーターゲルタイプの含水爆薬に特有の現象である。

ウォーターゲルタイプの含水爆薬は、酸化剤溶液中にアルミニウム粉等の固型成分が分散し、さらに多数の微小気泡成分が分布している3相成分混合物の形となっており、一般に外観は固型状であるが、軟かく弾力性があり、ほぼソーセージ様である。

そこで本研究では、これら含水爆薬の諸特性をふまえ、上述した特有の不発残留現象を解明することを目的とし、気泡成分として化学発泡剤によるガスバブル、あるいは2種類のガラスマイクロバルーン（以下GMBと略す。）を添加した模擬薬について力学的な特性値を求め、次に衝撃波入力に対する応答について検討した。

本研究は4報に分けて報告する。まず本報では振動

モデルを仮定し、その振動理論を用いて特に含水爆薬の静的な力学的特性値について気泡成分の種類、量による変化傾向を調べ、仮定した振動モデルの妥当性について検討した。

2. 弾性挙動に関する基礎理論

2.1 1質点、ばね-ダッシュポット系の自由減衰振動理論³⁾⁴⁾⁵⁾

本報では含水爆薬の静的な力学的特性値を検討する上で、Fig.1に示した1質点のばね-ダッシュポット

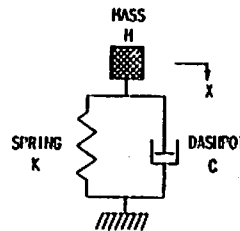


Fig.1 Single degree of freedom with viscous damper

系の振動モデル（フォークトモデル）を仮定した。

このとき質点の質量を M 、ばね定数を K 、減衰係数を C とし、質点の変位を X としたならば、質点の慣性力は $M\ddot{X}$ となり、変位に比例し逆向きに働くばねの復元力は $-KX$ 、変位速度に比例し逆向きに働くダッシュポットの抵抗力は $-CX$ となる。従って、何ら外力の加わっていない場合の振動、すなわち質点の自由

*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

**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

***横浜国立大学工学部
 〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156
 TEL 045-335-1541

振動に関する運動方程式は(1)式となる。

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = 0 \quad (1)$$

さらに $K/M = \bar{\omega}^2$, $C/M = 2h\bar{\omega}$ と置き換えれば(2)式となる

$$\ddot{X} + 2h\bar{\omega}\dot{X} + \bar{\omega}^2 X = 0 \quad (2)$$

(2)式の解を求めれば質点の振動の様子がわかるが、ここでは減衰振動をする場合、すなわち $h^2 - 1 < 0$ という場合について検討する。

このとき、初期変位を X_0 とするならば(2)式の解は次のようになる。

$$X = Ae^{-h\bar{\omega}t} \cos(\sqrt{1-h^2} \cdot \bar{\omega}t + \phi) \quad (3)$$

ただし、

$$A = X_0 \sqrt{1 + (h\dot{X}_0/\bar{\omega} \cdot X_0)^2 / (1-h^2)}$$

$$\phi = \arctan [-(h\dot{X}_0/\bar{\omega} \cdot X_0) / \sqrt{1-h^2}]$$

(3)式は振幅が $Ae^{-h\bar{\omega}t}$ 、振動数が $\sqrt{1-h^2} \cdot \bar{\omega}$ なる振動を表わし、振幅は時間とともに指数級数的に減少する。 $X_0 = 0$ の場合に、異った減衰定数 h をとる時の変位の時間変化を Fig. 2 に示す。減衰定数が早く終る傾向、すなわち振動エネルギーの内部吸収が大きくなることを示している。

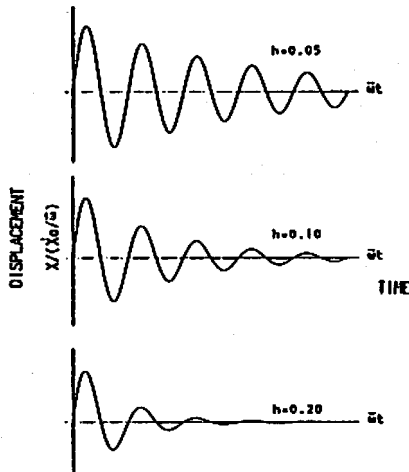


Fig. 2 Examples of free vibration pattern

2.2 力学的特性値の計算

本報では弾性振動に関する以下の関係式を用いて、実験結果から力学的特性値を算出した。

1) 振動周波数と剛性率⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

高次モードの振動は一般に減衰の効果が大きく、振動自体が把握しにくい。従って、実際に起こる振動は1次モードと考えて良く、このとき次の関係式が成立する。

$$G = 16 \cdot H^2 \cdot f^2 \cdot \rho \quad (4)$$

あるいは

$$f = \frac{1}{4H} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5)$$

ここで G は剛性率、 H は試料高さ、 f は振動の周波数、 ρ は試料密度を表す。

2) 弾性横波速度と剛性率⁽⁸⁾⁽⁹⁾

弾性横波速度を V_s とした

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (6)$$

あるいは、

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (7)$$

という関係式が成立する。

3) 対数減衰率と減衰定数

対数減衰率と減衰定数はいずれも減衰状態を表わす数値である。減衰振動の任意の隣り合った変位ピークを X_n , X_{n+1} とし、(3)式に代入して2比をとると、

$$\frac{X_n}{X_{n+1}} = \exp\left(\frac{2\pi h}{\sqrt{1-h^2}}\right)$$

となる。両辺の対数を取り、 δ とすると(8)式となり、これを対数減衰率という。さらに h を減衰定数といい、(8)式から(9)式が得られる。

$$\delta = \ln\left(\frac{X_n}{X_{n+1}}\right) = \frac{2\pi h}{\sqrt{1-h^2}} \quad (8)$$

$$h = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (9)$$

振動波形の実測データを用いてこの時の振動周波数を求めれば、(4)式から剛性率、(7)式から弾性横波速度を算出でき、逆に弾性横波速度を求めれば、(6)式から剛性率、(5)式から振動周波数を算出できる。さらに隣り合ったピークの比をとる事により、対数減衰率、減衰定数を算出できる。

3. 実験試料

実験に用いた試料は、絶て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、さらに化学発泡剤によるガスバブル、あるいは2種類のGM Bを添加して気泡成分の種類、量を変えたウォーターゲルタイプの含水模擬爆薬である。試料の配合の概略を Table 1 に示す。試料は多数調製したが、代表的な試料について実測密度および気泡成分の含有量を Table 2 に示す。

化学発泡剤は混合により窒素ガスを発生する。

Table 2 Density and contents of gas bubbles or GMB

Sample type	Density (G/CC)	Contents (vol. %)	
		gas bubbles	GMB
Base	1.46	—	—
G	1.37	6.2	—
	1.29	11.6	—
	1.10	24.7	—
	1.01	30.8	—
	0.86	41.1	—
B	1.40	—	5.1
	1.34	—	10.2
	1.26	—	16.9
	1.16	—	25.4
	1.01	—	38.1
C	1.35	—	8.4
	1.22	—	18.3
	1.05	—	31.3
	0.93	—	40.5
	0.73	—	55.7

Table 1 Composition of dummy water-gel explosives

Oxidizing soln. (An, Cn……)	90 Parts
Gassing agent or GMB	0—10
Others	5

GMBはいずれも米国スリーエム社製で、C15/250 (10%破壊圧力250psi=約18kg/cm², 粒子密度約0.15g/cc), およびB28/750 (10%破壊圧力750psi=約54kg/cm², 粒子密度約0.28g/cc)を用いた。いずれも中空ガラス球で、粒径約20—130μm, 殻の厚さ約0.5—2.0μmである。

なお、Table 2に示した試料記号のうちBASEは気泡成分をまったく加えていない試料、Gは化学発泡剤によるガスバブルを加えた試料、BおよびCはそれぞれGMBのうちB28/750, C15/250を加えた試料を交わす。

4. 実験方法

4.1 自由減衰振動の測定方法

Fig. 3に示すようにテーブル上に固定した試料の頭部に加速度計(リオン製, PV-36型)を設置し、試料の上部角を軽く叩いて自由振動をさせた。このときの

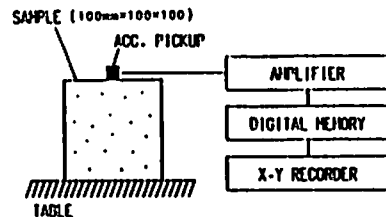


Fig. 3 Measurement of damped vibration

加速度計の出力をアンプ(リオン製, VM-21B型)を介してデジタルメモリー(NICOLET製, 4094型), およびX-Yレコーダー(渡辺測器製, WX-4422型)に記録して自由振動波形を得た。

4.2 弾性横波速度の測定方法

弾性横波速度はFig. 4に示すように、試料に2個の加速度計を設置して、試料を叩き、各加速度計の出力波形の立上り時間差および加速度計の設置距離の差を同時に測定して求めた。用いた機械は自由減衰振動の測定に使用したものと同じものである。

5. 実験結果

5.1 自由減衰振動

得られた自由振動波形の例をFig. 5に示す。また、振動波形から求めた固有振動数を各気泡成分の含有量に対してプロットして、気泡成分の種類、量による変化傾向を示したのが、Fig. 6である。なお、同時に(5),

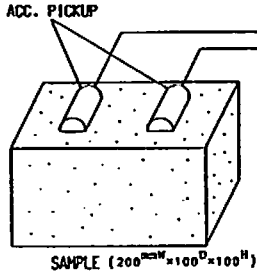


Fig. 4 Measurement of s-wave velocity

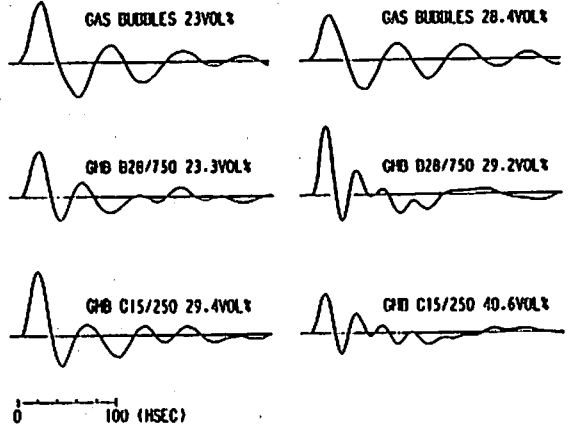


Fig. Examples of wave form of damped free vibration

(6)式から弾性横波速度を用いて算出した固有振動数も示した。

5.2 弾性横波速度

測定波形から算出した弾性横波速度を各気泡成分の

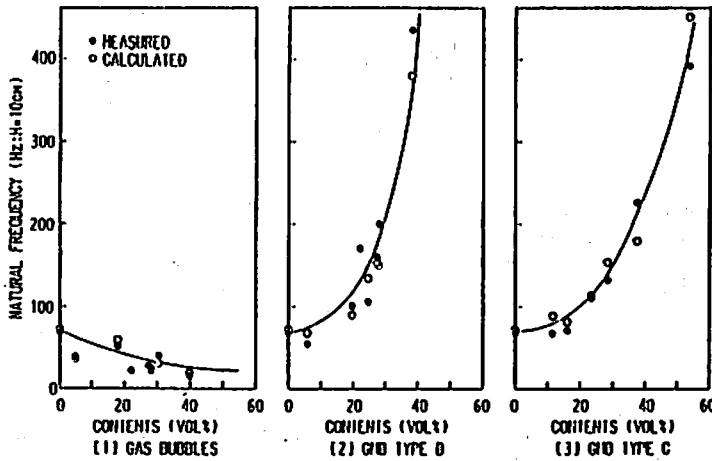


Fig. 6 Relation between damped natural frequency and contents of gas bubbles or GMB

含有量に対してプロットして、気泡成分の種類、量による変化傾向を示したのが Fig. 7 である。なお、同時に(4)、(7)式から固有振動数を用いて算出した弾性横波速度も示した。

6. 考察

6. 力学的特性値

自由減衰振動の周波数および弾性横波速度から各々(4)式、(6)式を用いて算出した剛性率を気泡成分の含有量に対してプロットして、気泡成分の種類、量による変化傾向を示したのが Fig. 8 である。また、(8)式および(9)式により、振動波形から算出した減衰定数の変化傾向を Fig. 9 に示した。

Fig. 6 および Fig. 7 から明らかなように測定値と理論による計算値は、若干のばらつきはあるがほぼ良い

一致を示した。従って本報で用いた測定方法、仮定した振動モデルおよびその理論は、今回用いた試料(含水模擬薬)についてその静的な力学的特性値を考慮する際に適用できるものと考えられる。いいかえれば、含水爆薬の静的な挙動(応答)は仮定した振動モデルにおきかえて考察することができる。

気泡成分としてガスバブルを添加した場合には、含有量が多くなるのに従い剛性率は徐々に低下してゆくのにに対して、GMB を添加した場合には、含有量20vol.%程度まではゆるやかに増加し、それ以上では飛躍的に大きくなり、その傾向は同じ含有量ならば B28/750 のほうが C15/250 よりやや大きい。従って、ガスバブルを含有する場合には柔らかくなり、すなわち圧力に対する変形が小さくなる事がわかる。また、弾性横

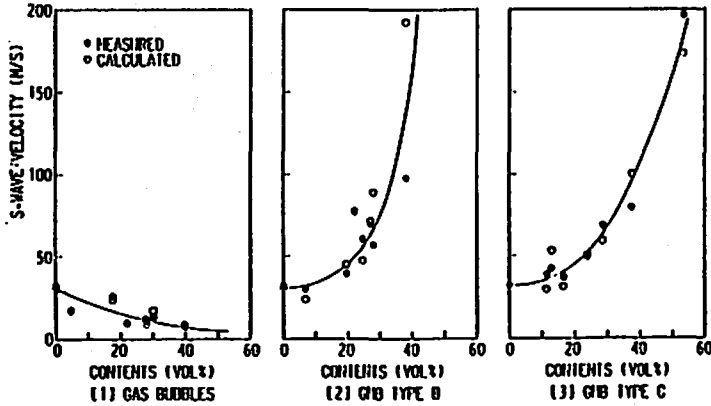


Fig. 7 Relation between s-wave velocity and contents of gas bubbles or GMB

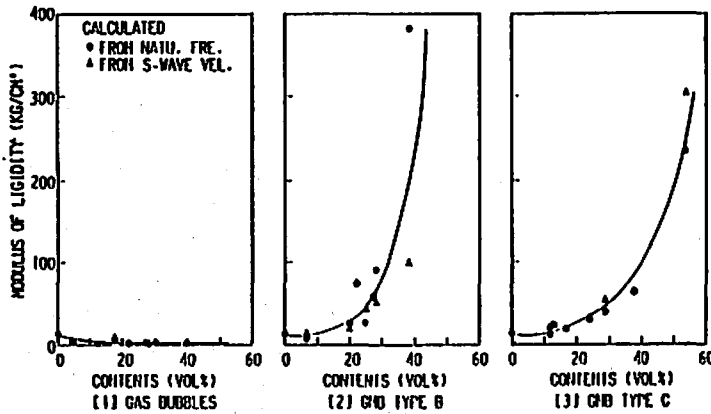


Fig. 8 Relation between modulus of rigidity and contents of gas bubbles of GMB

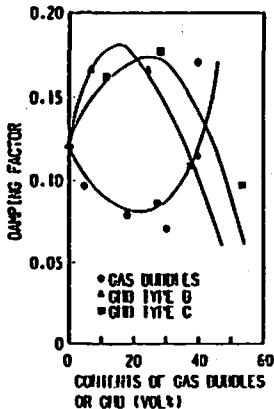


Fig. 9 Relation between damping factor and contents of gas bubbles or GMB

波速度についてもほぼ同じ変化傾向を示した。

6.2 振動の持続性

減衰定数の変化傾向は Fig. 9 に示した。すなわち、ガスバブルを含有する場合には、含有量が増加するのに従い、はじめ減衰定数は減少傾向（振動がより長く持続する傾向）を示すが、20-30 vol.% を境に増加傾向となる。これに対して GMB を含有する場合には、逆に増加傾向から減少傾向に転ずる。これは、気泡成分そのものの特性、すなわち自由な気泡であるかあるいは、殻を持った気泡であるかの違いと基本成分（含水爆薬ゲル）との混合率によるものと思われるが詳細については検討を要する。各気泡成分の含有量 20 vol.% について、初期変位を一定とした場合の減衰振動の様子を推定したのが Fig. 10 である。これによれば、減衰定数に加えて各試料の固有周波数の効果が表われるために、ガスバブルを含有する試料に比べて GMB を

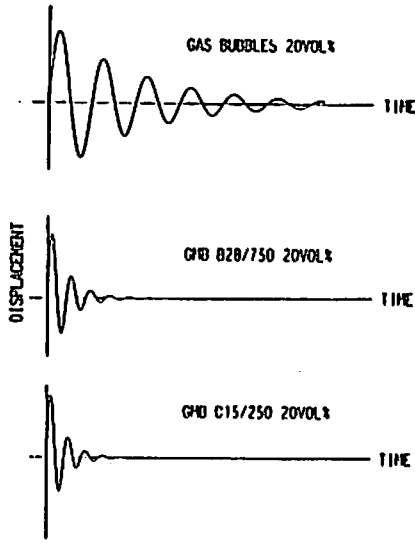


Fig. 10 Vibration profile of sample

含有する試料は非常に早く減衰してしまうことがわかる。

6.3 今後の課題

以上のように本報では、含水爆薬の力学的性質に関する研究の第1歩として、まず振動モデルを仮定してそれをもとにした理論値と測定結果との比較により、含水爆薬の静的な力学的性質を考察するときに仮定したモデルが適用できる事が確かめられたが、このとき試料に加えられた力は非常に小さく、比較的低周波領域であるから、実際の発破のように高圧力、高周波数の衝撃波入力の場合には、今回得られた特性値と異った挙動を示すことは十分に予想される。例えば、そのような高圧下ではGMBは直ちに破壊されてしまう、すなわち塑性挙動を示すようになるし、また剛性率などは周波数依存性がある事は良く知られている。

従って、今後の課題としては高圧力、高周波数条件下の特性値について明らかにする点にある。

7. 結 言

1 質点のばね-ダッシュポット系の振動モデルを仮定して、ウォーターゲルタイプの含水模擬薬の自由減衰振動波形から静的な力学的特性値を求め、含有する

気泡成分の種類、量によってどのような変化傾向を示すかを検討した。その結果、次の事項が明らかになった。

- (1) 仮定した振動モデルによる理論値と測定値は良い一致を示し、実験条件のように「静的な」状態では含水爆薬の挙動を調べる時このモデルを適用できることが確かめられた。
- (2) 気泡成分としてガスバブルを含有する場合には、含有量が増加するのに従い、剛性率は低下して変形しやすくなり、弾性横波速度も低下してゆく。また振動の減衰定数は、はじめ小さくなるが、さらに含有量が多くなると逆に大きくなる傾向を示した。
- (3) GMBを含有する場合には、含有量が増加するのに従い、剛性率は増加して変形しにくくなり、弾性横波速度も大きく増加する。また減衰定数は、はじめ大きくなり、さらに含有量が多くなると逆に小さくなる傾向を示した。
- (4) 以上のようにガスバブルとGMBではその力学的特性値への効果はまったく逆の傾向を示した。しかしながら、本報で得られた結果はあくまでも低圧力、低周波数領域でのものであって、隣接孔等からの衝撃波入力に対する挙動を調べるためにはさらに検討が必要である。

本研究にあたって大成建設株式会社 藤原 昭二氏、日本カーリット株式会社 木村 昭氏の御協力をいただいた。記して感謝する。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) 花崎、酒井：工業火薬、42、208 (1981)
- 2) M. J. Ball, R. Watt: Tunnelling, 76, 135 (1976)
- 3) 大崎：振動理論、彰国社 (1980)
- 4) 石原：土質力学の基礎、鹿島出版会 (1980)
- 5) 谷口：振動工学、コロナ社 (1978)
- 6) 石原、木村：土質力学、彰国社 (1980)
- 7) 機械設計便覧編集委員会：機械設計便覧、丸善 (1980)
- 8) 谷口：振動工学ハンドブック、養賢堂 (1976)

Experimental Studies on Dynamic Properties of Water-gel Explosives (I)
— Mechanical Properties —

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

The authors have obtained mechanical properties (rigidity, damping factor and s-wave propagation velocity) of dummy water-gel explosives which have various quantity of gas bubbles or some kinds of glass micro balloons (GMB) with various content.

When dummy water-gel explosives contain gas bubbles, their rigidity, damping factor and s-wave propagation velocity decrease with the increase of gas bubbles. On the other hand, when they contain GMB, those properties increase with the increase of GMB.

Thus, mechanical properties of dummy water-gel explosives are greatly affected with both kind and quantity of gas bubbles or GMB. Therefore, when a shock pressure propagates into water-gel explosives, it is easily supposed that there is a great difference in shock response between the explosives which contain gas bubbles and those which contain GMB.

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

**Taisei Corporation Technical Research Institute, Nase-machi 344-1, Totsuka-ku, Yokohama

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