

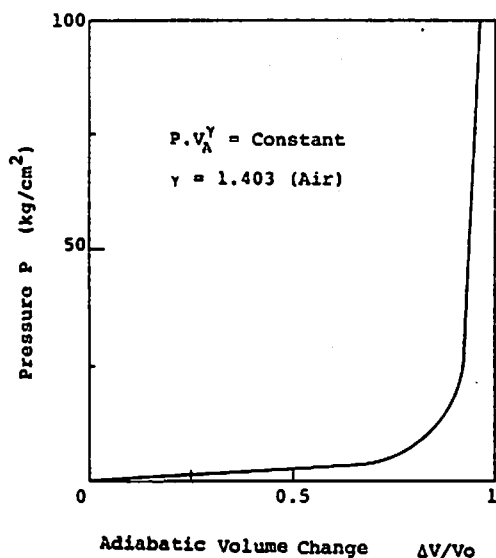


Fig. 2 Adiabatic change of air

図において縦軸に圧力、横軸に断熱体積変化を示しているが、気体ではこのような現象が生じる。一般に、防振ゴムやシリコンゴムのように柔軟で圧縮性をもつ材料の場合、衝撃圧力を受けると気体の断熱変化に類似した傾向の変形や体積変化をする性質がある。

2.2 材料の力と変形に関する基本式

材料が外力を受けると変形するが、このときの状態を示す一般式は次のように示される。

$$\left. \begin{aligned} E &= \sigma_1 / \epsilon_1 \\ \nu &= \epsilon_3 / \epsilon_1 \\ K_G &= \tau / \epsilon_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで E はヤング率であり、 σ_1 は応力、 ϵ_1 はひず

み、 ν はポアソン比、 ϵ_3 は外力と直交方向のひずみ、 K_G は剛性率、 τ はせん断応力、 ϵ_s はせん断ひずみを示す。

つぎに体積弾性率 K_V は

$$K_V = P / (\Delta V / V_0) \quad (2)$$

ここで P は圧力、 ΔV は体積変化量、 V_0 は初期体積を示す。

体積弾性率 K_V と剛性率 K_G はヤング率 E とポアソン比 ν の関係式で示される。

$$\left. \begin{aligned} K_V &= E / 3 (1 - 2\nu) \\ K_G &= E / 2 (1 + \nu) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)よりヤング率 E を消去すると

$$K_V = 2 K_G (1 + \nu) / 3 (1 - 2\nu) \quad (4)$$

で示すことができる。

3. 圧力を受ける含水爆薬の体積変化に関する実験

3.1 実験目的

含水爆薬は軟弱な素材に気泡成分を含ませたものであり、衝撃圧を受けると気体の断熱変化を含む体積変化を起こしやすい性質があると考えられる。すなわち、基剤だけの場合と比較して、気泡成分を含有する試料の場合には、体積変化を起させるのに必要な圧力はより小さいもので十分である。従って(2)式で述べた体積弾性係数 K_V は小さい値になることが予測される。

このような予測事項を確かめるために、異なる性質の気泡成分を含有する含水爆薬について静的、動的な加圧実験を行った。

3.2 試料

ウォーターゲルタイプの母材から鋭感剤であるアルミニウム粉末を除いたものを基剤とし、この基剤に気泡成分を含ませたものを試料とした。気泡成分の1つ

Table 1 Sample type and gas content

Sample Type		Vol. contents of gas (%)	Density (g/cc)
Base		0	1.5
GMB B	B-1	5	1.4
	B-4	20	1.2
	B-10	40	1.0
GMB C	C-1	12	1.3
	C-4	33	1.0
	C-10	56	0.7
G	G-1	9	1.3
	G-4	19	1.2
	G-10	35	0.9

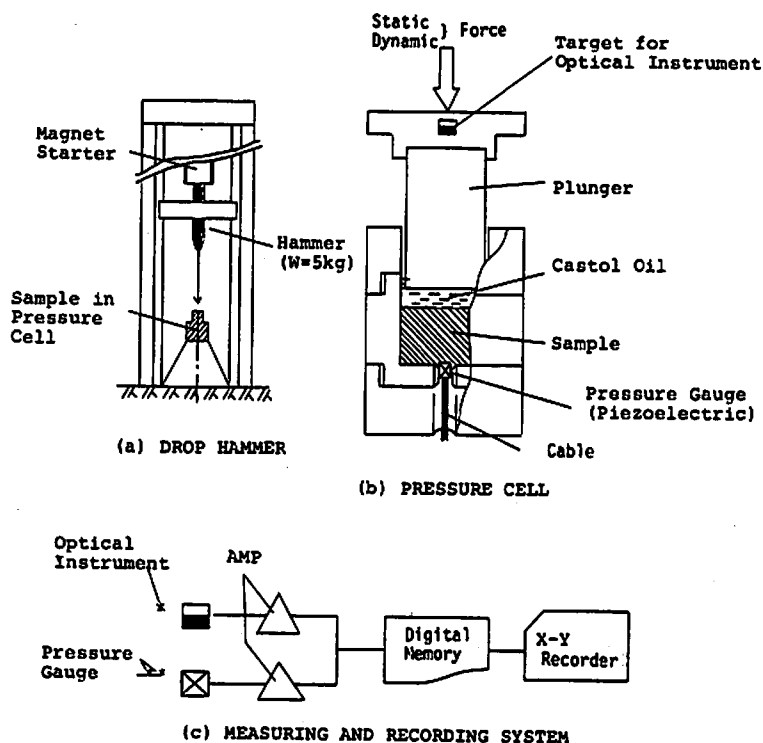


Fig. 3 Apparatus

は GMB であり、粒子の 10% 破壊圧力が 54 kg/cm^2 の B 種と、粒子の 10% 破壊圧力が 18 kg/cm^2 の C 種を別個に添加している。他の気泡成分は化学発泡剤であり、ガスバブルが発生され、試料に含有される。

各気泡成分の配合は Table.1 に示すように、各々 3 通りとした。試料の寸法は直径 40mm、高さ 30mm とした。

3.3 実験用機器

実験に使用した装置および計測方法を Fig. 3 に示し

た。Fig. 3 (a) 図は落つちによる衝撃試験方法の概要を示しており、(b) 図は压力容器と圧力計の取付け位置等を示している。(c) 図は計測記録方法を示している。

3.3.1 加圧装置

加圧装置として、静的加圧実験では万能圧縮試験機を用い、動的加圧実験では 5 kg 落つち感度試験機を用いた。

Fig. 3 の (b) 図に示した压力容器は試料の変形を加

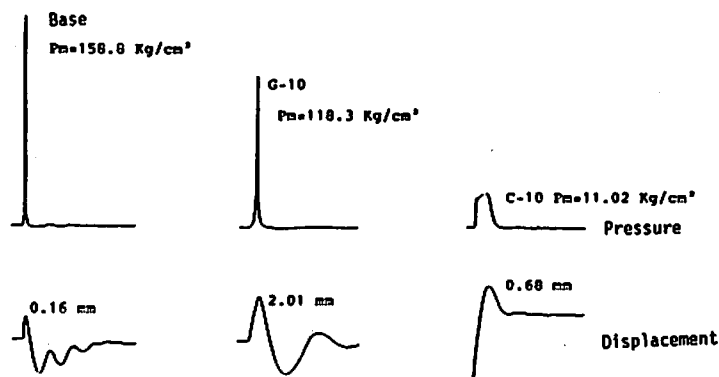


Fig. 4 Waveform of pressure and displacement

圧方向だけに生じさせる構造としている。

3.3.2 計測機器

Fig. 3 の (c) 図に示した計測機器の詳細は次の通りである。

まず光学式変位計は ZIMMER 製であり、圧電型圧

力計は KISTLER 製の 607A 型である。デジタルメモリは NICOLET 製の 4094 型であり、X・Y レコーダは渡辺測器製の WX-4424 型である。

3.4 実験および計測方法

加圧時には Fig. 3 の (b) 図に示すプランジャーとひ

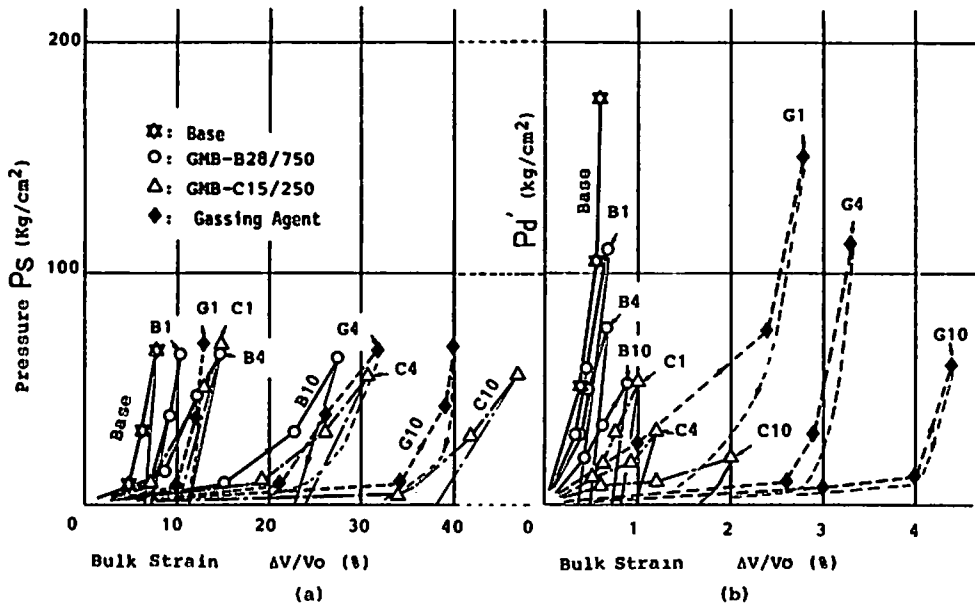


Fig. 5 Pressure and bulk strain

(a) Static test (pressure, step upped)

(b) Dynamic test hit by drop hammer (drop height, changed)

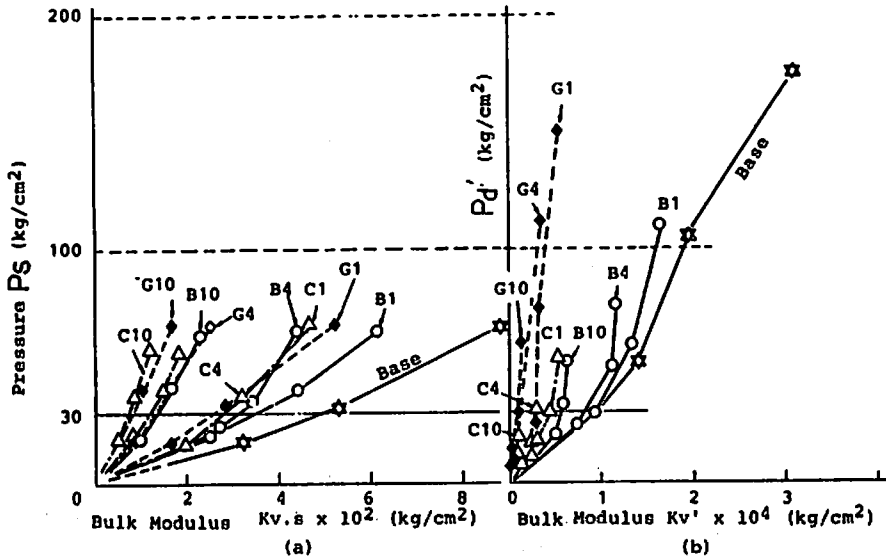


Fig. 8 Pressure and bulk modulus

(a) Static test (b) Dynamic test

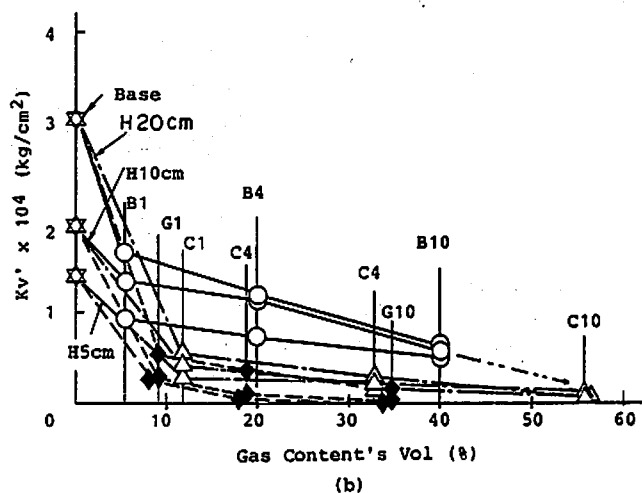
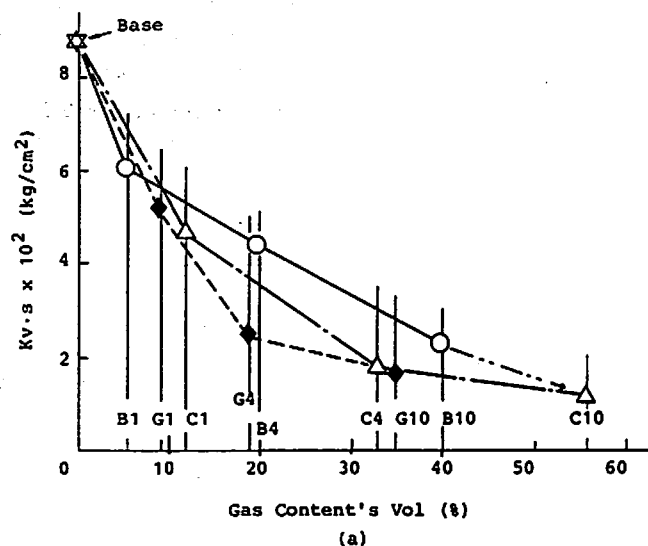


Fig. 7 Bulk modulus and gas content's
(a) Static test (b) Dynamic test
H: Height of drop hammer

まし油を介して各試料に静的、動的圧力を加えた。

静的加圧実験では、プランジャー上端に加圧機をおき静的圧力を段階的に増加させる方法で各試料に静的圧力を加えた。

衝撃加圧実験では、Fig. 3の(a)図に示す落つい試験機のハンマーをプランジャー上端に衝突させる方法で各試料に衝撃圧を加えた。この時、ハンマーの落下高さを5、10、20 cmの3段階として、ハンマーを1回落下させる毎に試料を新しいものと交換した。

静的または動的加圧で各試料に生じた圧力は、各試料の下部に密着した圧力計によって計測した。この圧力計は圧力セル下部に設置されている。

各試料の体積変化を測定するために、プランジャーの上下方向の変位を非接触の光学式変位計で計測した。

これらの圧力と変位は同時計測し、一旦デジタルメモリーに記憶させた後に、X・Yレコーダーで波形として記録した。Fig. 4に等しい衝撃圧力を加えた場合の基剤、ガスバブル10%含有試料およびGMBのCを10%含有試料の圧力波形例を上段に示し、変位波形を下段に示した。

記録波形より、各実験毎の圧力最大値と、変位の最大値を読み取り、変位の最大値と試料の断面積を積算して、各試料の体積変化量を求め、式(2)に代入して体積弾性率を求めた。

4. 実験結果

実験によって得られた結果を Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 に示す。

Fig. 5 は測定圧力と体積ひずみの関係を示した図である。図は (a), (b) に分けて示してあるが縦軸は圧力を示し、横軸は体積ひずみを示している。(a) 図は静的加圧実験結果であり、圧力は段階的に増加している。(b) 図は動的加圧実験結果であり、圧力は落ついの落下高さによって変化させてある。図中に示した B, C, G の後の添字は各気泡剤の含有率を体積%で示したものである。

Fig. 6 は圧力と体積弾性率の関係を示した図である。本図においても縦軸は圧力を示し、横軸は体積弾性率を示している。静的加圧実験時の測定圧力を P_s 、体積弾性率を $K_{v,s}$ 、動的加圧実験時の測定圧力を P_d' 、体積弾性率を $K_{v'}$ として示した。

Fig. 7 は体積弾性率と気泡成分含有率の関係を示している。縦軸は体積弾性率を示し、横軸は気泡成分含有率を示している。(a) 図は静的加圧試験結果を示しており、(b) 図は動的加圧試験結果を示している。

5. 含水爆薬の体積変化に関する考察

5.1 体積ひずみの変化について

5.1.1 静的加圧による体積ひずみの変化

静的圧力 P_s と体積ひずみ $\epsilon_v = \Delta V / V_0$ の関係について Fig. 5(a) の圧力・ひずみ曲線より得られる特徴は次のとおりである。

各試料とも、圧力が $5 \sim 10 \text{ kg/cm}^2$ を境にして、圧力・ひずみ曲線の勾配が変化している。この変化形状は Fig. 2 に示した気体の断熱変化またはゴム等の材料の圧力・ひずみ曲線の傾向と類似している。

気泡成分の相違について検討すると、圧力が $5 \sim 10 \text{ kg/cm}^2$ 付近では各試料の体積ひずみが基剤だけの試料 < GMB の B を含有する試料 < ガスパブルを含有する試料の順に大きくなることが認められる。また気泡含有量が多い試料になるほど体積変化が大きくなることも認められる。

ところで、圧力が 60 kg/cm^2 の場合は、体積ひずみを各試料の密度に応じて 3 グループに大別できる。

第 1 グループは密度が $1.2 \sim 1.3 \text{ g/cc}$ の G1, C1, B4 の試料であり、このときの体積ひずみは約 14% である。第 2 グループは密度が $1.0 \sim 1.2 \text{ g/cc}$ の G4, C4, B10 の試料であり、このときの体積ひずみは約 30% となる。第 3 グループは密度が $0.7 \sim 0.9 \text{ g/cc}$ の G10, C10 の試料であり、体積ひずみは 40% にも達する。このように圧力が大きくなると、各試料の密度に反比例するように体積ひずみが増加し気泡成分の種類による差は明らかではなくなる。

5.1.2 衝撃圧力を受けた試料の体積ひずみ

動的試験時の測定圧力 P_d' と体積ひずみの関係を Fig. 5 の (b) 図をもとに検討する。

圧力・ひずみ曲線の関係を試料が静的圧力を受けた場合と比較すると、各試料の密度差に応じて変っていた特徴が認められず、衝撃圧力を受けた場合には、GMB の B を含有する試料 < GMB の C を含有する試料 < ガスパブルを含有する試料の順に体積ひずみが大きくなって行く。すなわち、衝撃圧力を受けた場合の試料の体積ひずみは、試料が含有する気泡成分の性質すなわち種類と関係することが認められる。

つぎに、気泡成分の含有量について検討すると、体積ひずみは、気泡成分の含有量が多くなるに従い大きくなっていることも認められる。

5.2 除圧後の体積ひずみの残留について

静的圧力を加えた場合および衝撃圧力を加えた場合には、除圧時に体積は元に戻ろうとする。この除圧時の戻りは Fig. 5 の (a) 図、(b) 図共に細線で示した。

除圧後の残留体積ひずみは、GMB の B を含有する試料および GMB の C を含有する試料においても、体積ひずみ最大値の約 60% である。一方、ガスパブルを含有する試料では、多少の時間遅れを生じるが、体積ひずみの残留は認められない。

この傾向から、GMB を含有する試料では、圧力の作用で試料に含まれる GMB の一部分が破壊され、このためにガラス殻が消失し、ガラス殻内の減圧状態の気体が定圧になろうとするために体積減少を起すと考えられる。このように GMB を含有する試料は大きい圧力を受けた時に、塑性的な挙動をする。

ガスパブルを含有する試料の場合、圧力の作用で試料に含まれる気泡の一部分が、静的圧力下では圧縮され、衝撃圧力下では断熱変化し、共に体積減少が起る。しかし除圧後には元の体積に戻るため、ガスパブルを含有する試料は、ゴムのような弾性的な挙動をする。この原因の 1 つとしては、GMB の場合製造過程で気体が減圧封入されていること、一方、ガスパブルは大気圧のままで試料に混入されていることをあげることができる。

5.3 体積弾性率について

体積弾性率は式(4)に示したように、圧力と体積ひずみの比で表わされ、体積ひずみが大きくなると体積弾性率は小さい値を示すことになる。

Fig. 6 の (a) 図、(b) 図が圧力と体積弾性率の関係を示している。圧力・体積弾性率曲線を各試料について検討した結果、次のようなことが認められた。

まず体積ひずみを検討した場合と同様に、体積弾性率についても、静的圧力を試料に加えた場合には各試

料の密度と比例関係にあり、衝撃圧力が加わった場合には試料が含有する気泡成分の性質と関係する傾向がある。

また、圧力・体積弾性率曲線の傾向が2次曲線に近い下に凸の形状を示すが、変化の割合が静的圧力の場合と比べ衝撃圧力の場合は急激である。このように試料の体積変化率が衝撃圧力に対しより過渡的に変化し静的圧力を受けた場合は違った現象を示す。この挙動は試料に作用する時間とも関係があると考えられ、インパルスとして時間を含めた検討も有効と思われる。

5.4 体積弾性率と気泡成分含有量について

体積弾性率と気泡成分含有量の関係は Fig. 7 の (a) 図と (b) 図に示されている。この図より体積弾性率は静的圧力を受けた場合および衝撃圧力を受けた場合でも、気泡成分の含有量が増えるにつれて、下に凸の曲線を描き、低下して行く。この現象を気泡成分の種類で比較すると、体積弾性率の低下度合が GMB の B を含有する試料 < GMB の C を含有する試料 < ガスバブルを含有する試料の順に大きくなって行く。

この体積弾性率の低下傾向を数値的にみれば、各気泡成分含有量 20% の付近で各気泡の性質すなわち種類による体積弾性率の差が最大となり、以後気泡含有量 60% 付近で差がなくなる。第 1 報において、自由減衰振動を起こした試料の減衰係数と気泡成分含有率の関係が、気泡成分含有率 20% 付近で変化することを示したが、気泡成分含有率 20% 付近が 1 つの変化点を示しているものと考えられる。この点については、さらに検討を行う。

5.5 実験より得られた各定数等の比較検討

本実験において得られた実験結果より、体積弾性率と剛性率について検討する。

静的圧力を受けた時の測定圧力 P_s は載荷圧力とほぼ等しいが、衝撃圧力を受けた時試料の下部で測定した圧力 P_d' と載荷圧力とは等しくない。

ここで静的実験による圧力と衝撃実験による圧力の関係について考察する。

Fig. 5, Fig. 6 のように P_s と P_d' の同じ値に対し、平均して、静的圧力を受けた場合の体積ひずみが衝撃圧を受けた試料の体積ひずみの約 10 倍であり、また、静的圧力による体積弾性率は衝撃圧力を受けた場合に比較して約 1/50 になっている。これらの数値を式(2)

に代入して静的圧力による測定圧力と衝撃圧力による測定圧力の関係を求めると、静的圧力を受けた時の測定圧力 P_s は衝撃圧力を受けた場合の測定圧力 P_d' の 5 分の 1 となる。

つぎに、各試料の剛性率 K_G を推定するために、Fig. 7 の (a) 図より静的圧力を受けた場合の体積弾性率 K_V を気泡成分含有率 20% について読み取る。

各試料のポアソン比 ν は 0.45~0.5 の間で変動すると考えられるので、この数値を式(4)に代入すると、剛性率が求められる。次に剛性率を kg/cm^2 単位で示して、各試料について示す。

GMB の B を含む試料ではポアソン比が 0.46~0.47 の時に剛性率は 27~36 kg/cm^2 となる。GMB の C を含む試料ではポアソン比が 0.47~0.48 の時に剛性率は 14~21 kg/cm^2 となり、ガスバブルを含む試料ではポアソン比が 0.48~0.49 の時に剛性率が 5~10 kg/cm^2 となる。

第 1 報において述べた自由振動測定実験で求めた剛性率と静的体積弾性率より計算した各試料の剛性率とがよく一致することが確認された。

以上の考察から、実験開始前に予測されたように、含水爆薬に含まれる気泡成分の種類とその含有量が外圧を受けた含水爆薬の体積変化に大きく関与することが明らかになった。すなわち、衝撃圧力に対し、ガスバブルを含有する含水爆薬は気体の断熱変化を含む弾性的な挙動を示し、GMB を含有する含水爆薬は GMB の破壊による塑性的な挙動を示すことが観察された。このような挙動が外部からの衝撃圧の吸収特性に関与することが予測される。

本研究に当って日本カーリットの木村靖氏、大成建設の近藤昭二氏、荻原助氏のご協力をいただいた、また実験では横浜国立大学学生、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) 谷口、振動工学；コロナ社 (1980)
- 2) 機械設計便覧編集委員会、機械設計便覧；丸善 (1980)
- 3) 岸他；日本金属学会誌；46, 5 (1982)

Experimental Studies on Dynamic Properties of Water-gel Explosives
(Ⅲ) Volume Change by Impact Pressure

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

To clarify the cause of misfire in the blasting where a water-gel explosive is used, it is necessary to study the mechanical characteristics of the water-gel explosive as an elastic-plastic body. However, examples of this type of study have apparently not been published to date. The authors have studied, therefore, spring constant and attenuation constant of water-gel explosives by carrying out a free damping vibration experiment assuming a simple Voigt model. From the result, the authors could have a bright prospect that the way of thinking in accordance with the mechanics on elastic bodies would be applicable to the study on the mechanical characteristics of water-gel explosives.

As the next step, to explain the shock absorption property of the water-gel explosive by the way of thinking in accordance with volume modulus, the authors conducted a drop hammer test to examine the trend of volume changes resulting from application of shocks to the water-gel explosives.

As a result of the said test, the trend of volume changes greatly vary with a kind of bubble component (gas bubble or glass micro-balloon) and its content. In other words, while almost an elastic behavior was observed in case a relatively heavy shock was applied to an explosive containing gas bubbles, a plastic behavior was observed in case the shock was applied to an explosive which contains glass micro-balloons. This phenomenon is considered to be attributed to the collapse of glass micro-balloons, and the behavior as described which may be taking part in the absorption of the shocks applied from outside.

(*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)