

含水爆薬の爆轟特性(1)

田中 克己*, 米田 昭昭**

含水爆薬の爆轟特性を水中爆轟、高速度写真による爆轟状態の撮影、フラッシュX線による爆波の密度解析から求め、木原一疋田状態式による爆轟特性計算と2DLによる爆轟波解析結果と比較した。薬径30mmではアルミニウムを含む含水爆薬はアルミニウムを含まないそれに比べてエネルギーは大きい、爆速、爆圧は低いこと、含まれている硝安は完全に分解せずその反応率は50~70%程度であること、モノメチルアミンナイトレートは硝安の分解を助けている事がわかった。また木原一疋田式による爆轟温度は1000°K前後と非常に低いことがわかった。

1. 序

近年、日本でも研究、使用されるようになった硝酸アンモニウム(以下硝安)と硝酸モノメチルアミン(以下MMAN)、エチレンジリコールモノナイトレート、TNT、アルミニウム等の鋭感剤を混入、ゲル化した含水爆薬は安全性に優れた爆薬であるが未だ不明点が多い。ここではこれらの不明な問題のうち、爆圧力と爆轟のもつエネルギーについて調べた結果について報告する。

2. 実験

2-1 高速度写真による爆轟状態の撮影

アルミニウムを含む含水爆薬(Al-WG)とアルミニウムを含まない含水爆薬(WG)、2号楯ダイナマイトの爆轟状態を撮影速度200,000コマ/secの高速度コマ撮りカメラによって観測した。実験方法はFig.1に示すように6号電気雷管で導爆線を起爆し、同時にキセノンフラッシュのトリガーを行う。トリガーの同期は導爆線の長さによって行った。試料爆薬の起爆は

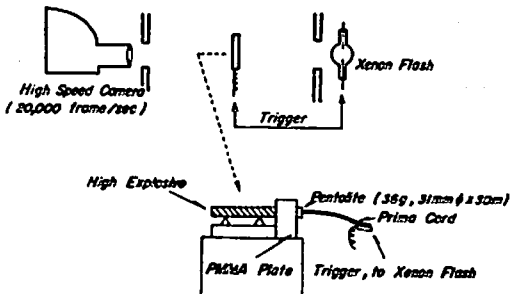


Fig. 1 高速度写真撮影概要

ペントライトによりPMMA板のギャップをとおして行った。使用した爆薬は薬径30mmの楯剤又は紙包装によるものである。含水爆薬については起爆の前に初温の影響をうけないようにするため予め20°C前後の水にひたしておいた。

得られた高速度写真から波面の位置と時間をプロットし、最小二乗法により一次近似した式を使って爆速を求めた。結果をFig.2に示す。次に高速度写真より爆轟波面近傍での爆轟ガスの円筒軸に対する膨張角度φを求める。空気自由面と考え、爆轟ガスの状態式を

$$PV^\gamma = P_{CJ} V_{CJ}^\gamma \quad (1)$$

とする。ここで、P, Vは各々圧力と比体積を示し、γは圧力の体積に対する変化の指数で、添字C-JはChapman-Jouget点の値を意味する。

(1)式よりC-J圧力は初期密度をρ₀として

$$P_{CJ} = \frac{\rho_0 D^2}{\gamma + 1} \quad (2)$$

$$\gamma = [(\alpha + 1)^2 + 1] / [(\alpha + 1)^2 - 1] \quad (3)$$

ここで α ≡ φ/90°

結果をTable1に示す。20mm径の裸薬包の場合、Al-WGは爆速、爆圧がWGより低い。2号楯ダイ

Table 1 高速写真により測定した含水爆薬の爆轟特性値

薬種	初期密度 (g/cc)	γ	爆速 (m/sec)	爆圧 (kbar)	φ (度)
WG	1.1	2.60 ± 0.01	4050	50.1 ± 1.2	45.0
Al-WG	1.1	2.41 ± 0.08	3450	38.5 ± 0.8	50.0
2号楯	1.5	2.6	3600	50.4	45.0

昭和52年7月1日受理

*東京工業試験所 平塚市西八幡1-3-4

**東京大学工学部反応化学科 東京都文京区本郷7-3-1

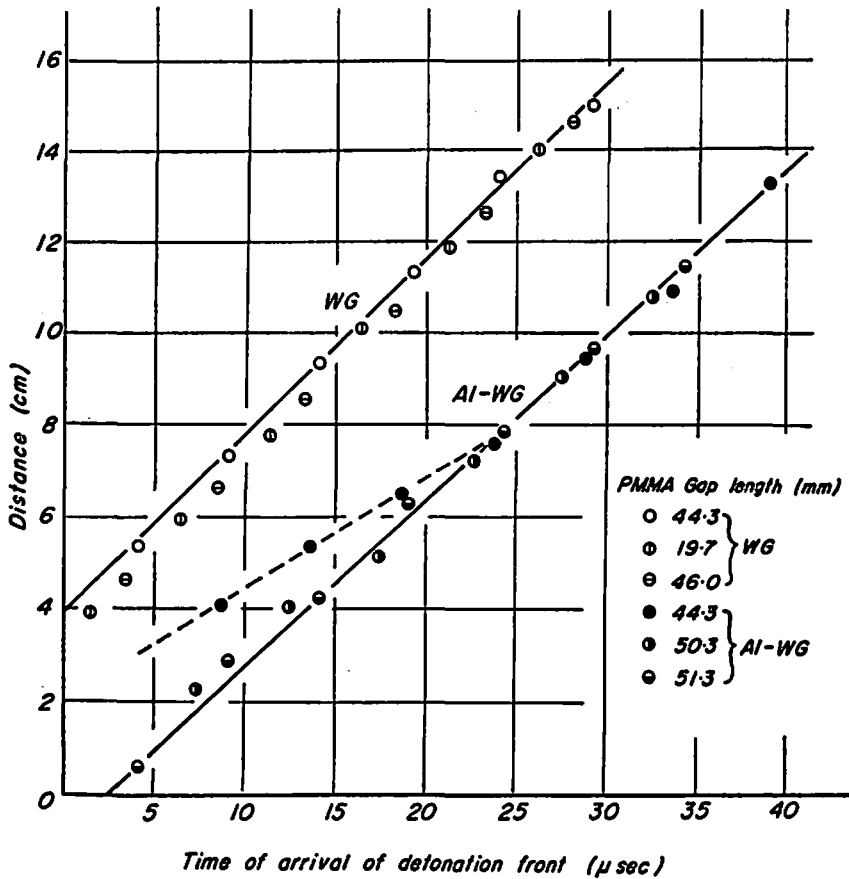


Fig. 2 高速度写真による爆轟波面位置の時間変化

ナマイトは通常の爆轟速度より遅いが、PMMA 板のギャップ長が大きすぎた事によると考えられる。この実験ではコマどりの時間間隔が大きく、露光時間が長いので測定精度は低い。

2-2 水中爆発によるエネルギー測定

気体、液体、固体等、爆薬の形状の如何を問わず、水中でこれらを爆発させた場合水中衝撃波とパルパルスと呼ばれる爆轟ガスの膨張と収縮の繰り返しの運動による圧力波を生ずる。これらの圧力波の時間変化を測定することにより爆薬のもつエネルギーを測定できる。この実験により測定されるエネルギーはビュッヘルポンプ等で測定されるエネルギーと異り、衝撃エネルギーのような動的なエネルギーとガスの膨張による静的なガスのエネルギーの両方のエネルギーに分けて正確に測定できる事である。特に含水爆薬のように爆轟における発熱機構や爆轟生成物がよくわかっていないものの爆轟特性の研究には有効である。

ここでは実験の都合上、爆轟ガスのパルパルスからガスエネルギーのみを測定した。実験は水深が約

2 m の広い水槽で行われた。爆薬は水面から 1 m のところに吊るされ、爆源から 1 m 及び 2 m の位置に Kistler 607A ピエゾゲージが設置された。圧力波形は Kistler の Charge Amp 504E を通して、データレコーダーで記録し再生した。得られたパルパルスよりガスエネルギーを求める式は次のようにして導かれる。

一次元球面波の圧縮性流体力学モデルによる解析例は正田¹⁾、Mader²⁾の論文に示されているが非圧縮性流体力学モデルを用いるとガスの運動はもっと簡単な式で表わさる。水を非圧縮性とした場合、Cole³⁾によれば、水中爆発の際のパルパルスの間隔 τ とガス球のもつエネルギー E_B は

$$E_B = 6.84 \times 10^7 \times P_0^{3/2} \times \tau^3 \rho_0^{-3} \quad (4)$$

τ ; sec, ρ_0 ; g/cm³, P_0 ; atm, E_B , Joule となる。ここで ρ_0 は水の初期密度, P_0 は爆薬の置かれた場所の絶対水圧である。

一方水中衝撃波のもつエネルギー E_s は次のようにして求められる。

Table 2 水中爆発により得られた爆薬のエネルギー

薬 種	薬量(g)	測定位置 (m)	パブルパルス間隔 τ (m/sec)	ガスエネルギー E_B (Joule/g)	エネルギー平均値 E_B (Joule/g)
ベントライト ($\rho_0 \approx 1.6 \text{g/cm}^3$)	100	1	94	1284	1362
	100	1	114	1440	
WG	200	1	128	910	992
	200	1	132	998	
	200	0.5	135	1067	
	80	1	95	930	
Al-WG	200	1	136	1091	1327
	200	1	144	1296	
	200	0.5	144	1296	
	200	0.5	146	1396	
	120	~1	124	1379	
2 号 楯	200	1	136	1091	1259
	200	1	140	1180	
	100	0.5	120	1499	
	100	0.5	84	721	
	衝撃波エネルギー (Joule/g)		ガスエネルギー (Joule/g)		備 考
ベントライト ⁽³⁾	—		1840		(349g PETN 起爆) 20g
MMAN ⁽⁴⁾	860		1840		
TNT ⁽⁴⁾	1030		2060		
Tovex 200 ⁽⁴⁾ Al 70%	730		1560		
Iremite ⁽⁴⁾ Al 40%	680		1630		

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_0 C_0} \int_0^t P^2(t) dt \quad (5)$$

ここで $P(t)$ は爆源からの距離における圧力の時間変化で C_0 は水の音速である。(4)式と(5)式は何れも無限水中を仮定した場合に得られるもので実際の条件とは若干異なる。

我々の測定結果と、他の実験データ⁽³⁾⁽⁴⁾を Table 2 に示す。Table 2 から、本実験値が若干低目のものである事がわかる。ベントライトでは Cole の値に比べて 35% 低い、これは測定したパブルパルスの時間間隔 τ が 10% 低いものである事を意味する。これは測定精度から考えて実験誤差ではない。この誤差は使用した水槽が無限水中という条件を満足していないために、最初のパブルパルスが発生する前に水面から圧力波や爆轟ガスが逃げた事によるものであろう。ガス球の最大半径 A_m は

$$A_m = \left(\frac{3 P_0}{2 \rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\tau}{\beta} \quad (5)$$

$$\beta = 2.2405$$

で求められる。本実験では水深は約 1 m であるが、100g のベントライトではガス球の半径は 70cm, 200g の含水爆薬では 90cm になる。したがって薬量は 10g から 20g が適量であるが使用した含水爆薬が 100% エネルギーを出すには小量すぎるという事で 200g とした。しかし、実験の傾向としては小薬量の場合の方が単位重量当りのエネルギーは大である。水中爆発による爆轟性気体混合物や爆薬のエネルギー測定についての研究は Kogarko⁽⁴⁾, Bjarnholt⁽³⁾らによって行われているが、小薬量かつ小型水槽という条件で正確に測定する技術を確立する必要があると思われる。参考までに、水中爆発で測定できるエネルギーは爆発熱の 1/2 がエネルギー、1/4 が衝撃エネルギーで、残りの 1/4 はガス、又は水温の増加のエネルギーとして消滅する。

2-3 フラッシュ X 線による測定

フラッシュ X 線 (Field Emission 型, Model 730/2710) により WG, Al-WG の爆轟状態を撮影した。X 線の Pulse 間隔は 30nsec, 300kV の電圧である。試料爆薬は X 線源から 110cm, X 線フィルムから



Photo 1 Mechanical Scanner による W.G. の瞬間 X 線写真の解析。薬径 30mm, 中央部の黒い部分が爆轟部で上方へ伝播していく。(原図はカラー)

70cm 離して置き、起爆は導爆線によった。得られた X 線写真は、日本 IBM サイエントフィックセンターの Mechanical Scanner⁶⁾により、X 線フィルムの濃度を 0.1mm 間隔でフォトマルにより準定し、フォトマルの出力を Analog-Digital 変換器により数値化し TEAC Interface Unit により IBM1131 CPU (Central Processing Unit) に送りこみ、結果をカラーディスプレイで処理したものである。出力結果を Photo 1 に示す。得られたフィルム濃度の等高線は、X 線が透過したところの爆轟ガス又は未爆発のフィルム上の単位面積当りの質量が同じところと考えてよい。これはフィルム面に垂直な方向の密度変化がなければ、爆薬の密度として直接読みとれるが、ここでは軸対称の円筒波である。得られた X 線フィルムから密度を求める事については既に吉田ら⁷⁾により報告されている。ここでは高速度写真より求められた爆轟ガスの状態式

$$PV^{\gamma} = P_{CJ} V_{CJ}^{\gamma} \quad (6)$$

と反応式 (C-J Volume Burn)

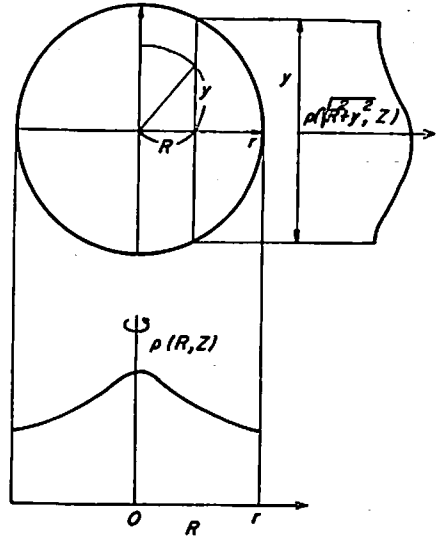
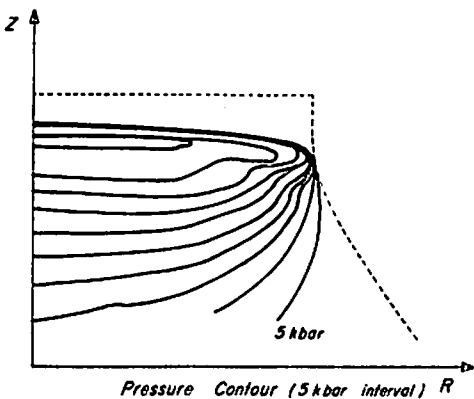


Fig. 3 X線写真の濃度プロファイル計算。ρはZにおける半径Rの位置の密度

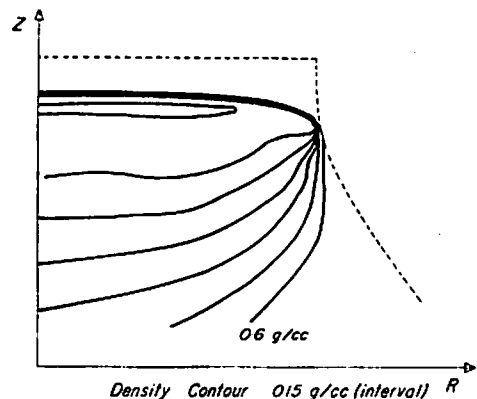
$$W = 1 - \frac{V_0 - V}{V_0 - V_{CJ}} \quad (7)$$

を用い、2次元軸対称の Lagrange 流体力学式による 2DL コード⁸⁾により WG の爆轟波の構造の解析を行って Photo 1 と比較した。(7)式の W は反応率で 1 の時が未反応、0 では完全に反応が終了したとする。(6)、(7)式において 30mm 径の操薬包 WG では γ , P_{CJ} , V_{CJ} , V_0 は各々、2.60, 50.6kbar, 0.657, 0.909cc/g である。

X 線フィルムと 2DL による解析線の比較の方法は Fig. 3 に示すようなものである。Fig. 3 の (R, Z) の位置のフィルム濃度を $f(R, Z)$ 、爆轟ガスの密度を



(a) 等圧線



(b) 等密度線

Fig. 4 2DL による WG の爆轟波型

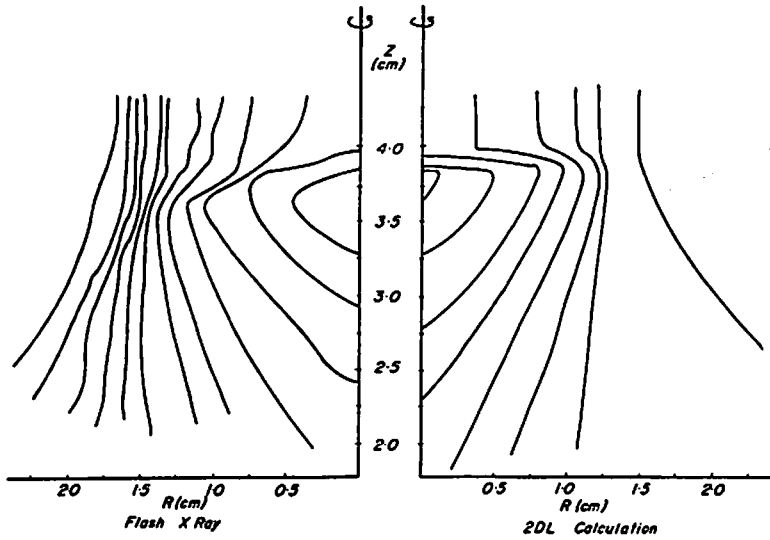


Fig. 5 Mechanical Scanner による WG の爆轟波の X 線写真の解析結果と 2DL による結果の比較

$\rho(R, Z)$ とすると

$$f(R, Z) = \int_0^{\sqrt{r_0^2 - R^2}} K \rho(\sqrt{R^2 + y^2}, Z) dy \quad (8)$$

となる。K を一定とし、2DL により求められた WG の密度プロファイルを(8)式に代入する。

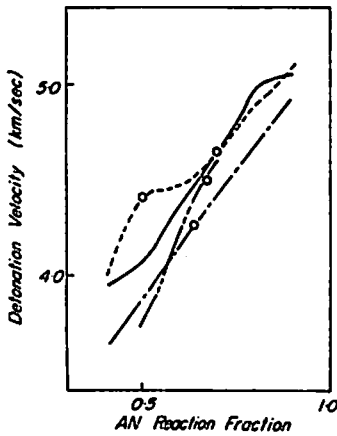
2DL による WG の爆轟波の等圧力線図、等密度線図を Fig. 4 に示す。また Mechanical Scanner に

よるフィルム密度と 2DL の結果の比較を Fig. 5 に示す。その結果、(6)式による状態式が実験とよく一致する事がわかる。

3. 考察

以上の実験結果について特に WG 中の硝安、MMAN の果たしている役割について考察する。

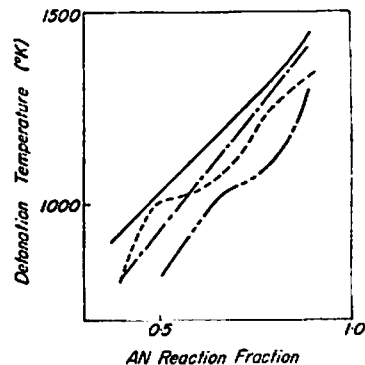
Dupont の特許⁹⁾に示された WG についての爆轟特性値を木原-疋田の状態式¹⁰⁾による計算結果と比較した。結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 からわかるように WG に含まれる硝安の完全分解を仮定すると爆速が実験値に比べて高くなりすぎる。そこで WG 中の硝安の一部を未反応の固体と仮定した。その結果硝安の分解率を50%か70%と仮定すると実測爆速に合致するようになる。ここで、硝安の高圧ゴニオと熱力学データは Los Alamos の実験値¹¹⁾を用いた。同様の見解は Mader¹²⁾が RDX, TNT, 硝安からなる Ama-



o 3 inch diameter

	MMAN	EDAN	AN	H ₂ O	SN	AI	FA	Cool
—	100		41.4	19.6	15.0	4.0	4.0	4.0
- - -			51.4	"	"	"	"	"
- · - ·	100		43.4	"	"	2.0	"	"
· · · ·	333	667	44.4	"	"	"	"	3.0

(a)



(b)

Fig. 6 木原-疋田式、硝安の分解率と爆轟圧(a)爆轟温度(b)の関係

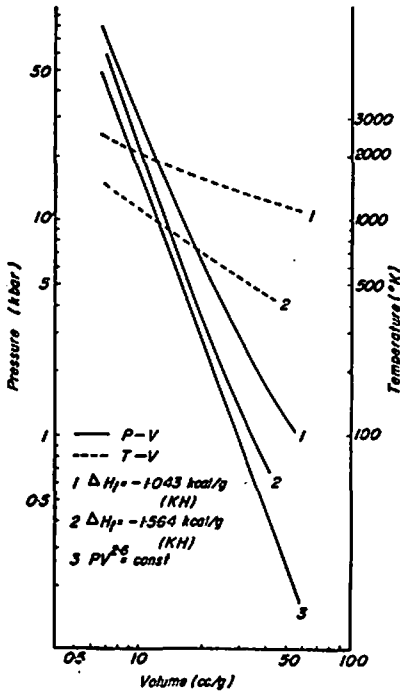


Fig. 7 木原-疋田式による 硝安の完全分解における等エントロピー曲線と、実験式の比較

tex と呼ばれる爆薬に適用し、また三井¹²⁾が硝安ダイナマイトに対して適用したものと基本的に同じである。WG に MMAN が含まれると硝安の分解率は若干よくなる。経験的であるがアミン類は硝安の分解を助長するようである。

Fig. 7 に WG 中の硝安が完全に分解するとした場合の木原-疋田式による圧力と体積の $P-V$ 膨張曲線を高速度写真より得られた $PV^\gamma = \text{const}$ の曲線を比較した。これからも硝安は完全に分解してないと考えられる。硝安の一部を未分解とした場合の木原-疋田式による $P-V$ 曲線は圧力の低下に伴う温度低下が大きく計算できなかったが、 $C-J$ 点付近では実験値と合うが低圧では実験値より低くなるようである。このことから硝安は爆轟波面では 50~70% 程度分解し、その後、徐々に分解しているものと考えられる。温度は計算によれば WG では 1500°K 前後と低く、これは高温でよく生成する NO や CO の生成が少ない事を意味する反面、アンモニア等の多原子分子の生成量が多くなる。

4. 結論

含水爆薬の爆轟特性に及ぼすアルミニウム、硝安、MMAN の役割は

- (1) アルミニウムを含む含水爆薬はエネルギーは大きい爆速、爆圧は低い。
- (2) 含まれている硝安は 50~70% 程度、爆轟波面近傍で分解し、その後、徐々に分解する。MMAN は硝安の分解を助ける。
- (3) 爆轟温度は低く、CO、NO の生成量が少ない。しかし NH_3 などは多く出る。

水中爆発によるエネルギー測定は小さい水槽では小薬量しか使用できないので、小薬量で完燃させるか、大薬量の場合の補正法を確立する必要がある。

謝 辞

本研究は工業火薬技術奨励会の援助により行われた。実験にあたって X 線、高速度写真装置を提供された熊本大学藤田教授、永山助手、Mechanical Scanner による解析を行っていただいた日本 IBM 飯坂博士、実験を手伝っていただいた東大大学院吉田正典氏と多くの貴重な助言をされた疋田東大名誉教授に深く感謝する。

文 献

- 1) 疋田, 工火誌, 36, 105 (1975)
- 2) Mader, C. L., "Compressible numerical calculations of underwater detonations", Los Alamos Scientific Lab., LA 4594 (1970)
- 3) Cole, R. H., "Underwater explosions", Princeton Univ. Press (1948)
- 4) Kogarko, S. M., Popov, O. E., and Novikov, A. S., Comb. Explosion and Shock waves, 11, 648 (1975)
- 5) Bjarnholt, G., Sixth (international) Symp. on detonation, preprints, 442 (1976)
- 6) Iisaka, J., Satoh, T., "Mechanical Scanner Users' Guide", IBM Scientific Center Report GE 18-1829-0
- 7) 吉田, 田中, 米田, 疋田, 工火誌, 38, 10(1977)
- 8) 田中, 疋田, 工火誌, 36, 116 (1975)
- 9) US Patent 3431155 (1969)
- 10) 田中, 疋田, 工火誌, 36, 210 (1976)
- 11) Mader, C. L., "An equation of state for non-ideal explosives", Los Alamos Scientific Lab., LA 5864 (1975)
- 12) 三井, 工業火薬協会50年度秋季年会 (1975)

Detonation properties of some unconfined water gels

Katsumi Tanaka* and Kuniaki Yoneda**

Detonation properties of unconfined water gels have been measured using underwater-explosion method, high speed framing camera and flash X-ray radiograph technique. Those obtained data are compared with Chapman-Jouget detonation calculated by Kihara-Hikita equation of state and compared with the result of two-dimensional hydrodynamic computation. Aluminized water gels have larger energy but lower detonation velocity and pressure than the non-aluminized water gels.

The ammonium nitrate is partially decomposed near the detonation front and a fraction of decomposition of ammonium nitrate is about 50 to 70%. A monomethyl amine nitrate catalyze the decomposition of ammonium nitrate. The calculated C-J temperatures are extraordinary lower than general high explosives.

* National Chemical Laboratory for Industry, Division of Safety and Environmental Chemistry,

Kanagawa-ken, Hiratsuka-shi, Nishiyawata 1-3-4

** University of Tokyo, Faculty of Engineering, Department of Reaction Chemistry.

Tokyo-to, Bunkyo-ku, Hongo 7-3-1

ニュース

発破振動・騒音で報告書

日本トンネル技術協会は、このほどトンネル工事の発破振動および騒音対策に関する調査研究報告書をまとめた。トンネル工事における発破振動、騒音は、昨年制定された振動規制法の対象外にあり、いまだ統一的な基準がないのが現状。報告書はこうした振動・騒音が問題となる場合に必要な軽減対策を見出すことを目的に、日本道路公団が日本トンネル技術協会に調査研究を委託していたもの。本調査では大きくわけて①発破による振動・騒音の理論的な取扱い、諸特性および受忍限度に関する現状知識のとりまとめ、②発破による騒音、振動に関する測定および対策事例収集と結果分析、③発破による振動、騒音に関する事前調査および測定法の検討、④発破振動、騒音の軽減対策方法に関しての方法と効

果の検討、⑤発破工法の代替として機械掘削による無発破工法の採用検討、⑥発破による振動、騒音に関係する規制、基準類および文献資料の収集——などを実施している。

今後の検討項目として、①トンネル工事の発破振動問題は、当初は構造物に対する被害が主体であったが、最近では人に対する影響が問題視されてきたことから、今後は振動速度と振動レベルの二種類のデータを集積し、両者の相互関係について検討する必要がある。②トンネル工事の発破振動、騒音は突発的かつ瞬間的であることから一般の振動、騒音に対する規制値をそのまま適用することは困難であり、今後は受忍限度を調査したうえで規制値を明確化していくことが必要である、としている。

日刊建設工業 52.5.13 (黒田)