

爆薬の諸特性と発破振動の相関関係

—水中発破による地盤振動—

黒川孝一*, 橋本賢二*, 川村 実*, 加藤幸夫*

発破に伴い発生する地盤振動の大きさは、爆源からの距離と薬量の関係としていくつかの推定式が提案されている。しかし、振動の大きさに影響を与えると考えられる衝撃波エネルギー、パブルエネルギー、爆速、弾動臼砲値等の爆薬の諸特性との関係については、従来から爆速の高い爆薬が振動が大きいと言われていた程度であり、明確な相関関係は明らかにされていない。

本報では、大別して2種類のエマルジョン爆薬を用いた。1種は、アルミニウムの添加量を変えて他の特性値をほぼ一定に保ち、パブルエネルギーのみを広範囲に変化させたエマルジョン爆薬であり、もう1種は気泡保持剤の粒径を変えて他の特性値をほぼ一定に保ち、爆速のみを広範囲に変化させたエマルジョン爆薬である。それらの爆薬を用いて、水中発破に伴い発生する地盤振動を測定し、地盤振動と爆薬の諸特性との相関関係について実験した結果を報告する。

地盤振動はパブルエネルギーの増加と共にほぼ直線的に増加した。又、その増加率は例えばパブルエネルギーが1.95 MJ/kgから4.35 MJ/kgに変化した場合地盤振動は1.17cm/sから1.96 cm/sに増加し、薬量増加による振動の増加率とよく一致していた。

衝撃波エネルギー及び爆速との相関は見られなかった。特に爆速については、爆速が2520 m/sから5320 m/sの範囲で変化しても地盤振動はほとんど変わらなかった。

1. 緒言

発破は爆薬のもつエネルギーを有効に利用するものであるが、爆発エネルギーの一部は地盤振動や音として周囲に放出される。発破に伴い発生する地盤振動の大きさは、一般に振動速度を V 、薬量を W 、爆源からの距離を D とすると、 $V=K \cdot W^m \cdot D^n$ で表わされる関係にあることはよく知られている¹⁾。関係式の定数 K には、発破工法、爆薬の種類(ダイナマイト、ANFO爆薬、含水爆薬等)、表土層の厚さ等の要因が総合的に含まれている。

発破振動に影響を与える爆薬の特性には、水中爆発エネルギーとして計測される衝撃波エネルギー、パブルエネルギー及び爆速、弾動臼砲値等が考えられる。

発破振動とそれらの爆薬の特性の関係としては、従来から爆速の高い爆薬が爆轟圧の立上り時間が短くなるため発破振動が大きいと言われていた²⁾。

今回、エマルジョン爆薬に添加するアルミニウム量を変えることによりパブルエネルギーを広範囲に変化

させた爆薬と、気泡保持剤の粒径及び添加量を変えることにより弾動臼砲値を一定に保ちながら爆速のみを広範囲に変化させた爆薬を用いることにより、水中発破に伴い発生する地盤振動と爆薬の諸特性の相関関係について検討した。

2. 実験方法

2.1 発破方法

発破方法は、振動発生源として再現性に優れた水中発破の形態で行った。

Fig. 1に示した形状(直径36 m、最深部の水深8 m)の水中爆発実験池において、試料爆薬を水深4 mに設置して起爆した。試料爆薬は薬量250 g(薬量変化の実験を除く)、形状は50mmφの円柱状である。

2.2 試料爆薬

試料爆薬Aは、アルミニウムの添加量を変えたエマルジョン爆薬であり、その組成及び諸特性値をTable 1に示す。試料爆薬Bは気泡保持剤の粒径及び添加量を変えたエマルジョン爆薬であり、その組成及び諸特性値をTable 2に示す。

試料爆薬に使用したエマルジョン爆薬のベースエマルジョンの組成は、酸化剤等(83.9%)、水(11.1%)、オイル(5.0%)である。試料爆薬の特性値のうち衝撃

1990年7月24日受理

*日本油脂(株)武豊工場化薬研究所

〒470-23 愛知県知多郡武豊町字西門82

TEL 0569-72-1954

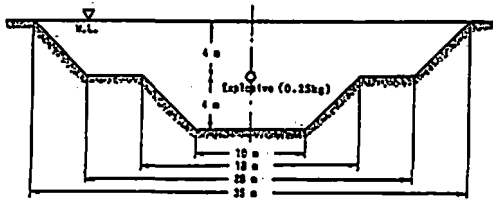


Fig. 1 Underwater explosion testing tank.

波エネルギー及びバブルエネルギーは、水中発破において振動を計測する際に同時に測定した³⁾⁴⁾。

試料爆薬Aは爆薬の特性として、バブルエネルギーを1.95MJ/kgから4.35MJ/kgの範囲で変化させ、衝撃波エネルギー及び爆速は比較的变化の少ない試料として使用した。弾動臼砲値については、弾動臼砲試験で使用する試料薬量が10gであり、試料爆薬Aはアルミ

Table 1 Composition and performance of sample explosives A.

Sample Explosives	Composition of Sample (wt %)			Initial Density (g/cm ³)	Detonation Velocity (m/s)		Shock Wave Energy (MJ/kg)	Bubble Energy (MJ/kg)
	Emulsion Matrix	Aluminium	Microballoon		25mm φ	50mm φ		
A-1	98.86	0	1.14	1.10	3390	4190	0.61	1.95
A-2	94.15	4.76	1.09	1.14	3390	—	0.71	2.10
A-3	79.09	20.00	0.91	1.22	3360	4140	0.86	3.30
A-4	65.91	33.33	0.76	1.38	3100	3860	0.94	3.90
A-5	56.49	42.86	0.65	1.47	2890	—	0.86	4.35
A-6	49.43	50.00	0.57	1.55	2690	3610	0.68	4.32
A-7	43.93	55.56	0.51	1.59	2460	3570	0.54	4.25

Average particle size of aluminium = 30 μm
Particle size of microballoon = 400~500 μm

Table 2 Composition and performance of sample explosives B.

Sample Explosives	Composition of Sample (wt %)				Initial Density (g/cm ³)	Detonation Velocity (m/s)		Shock Wave Energy (MJ/kg)	Bubble Energy (MJ/kg)	Ballistic Mortar Value (C TNT)
	Emulsion Matrix	Microballoon				25mm φ	50mm φ			
		A	B	C						
B-1	99.60	0.40	—	—	1.10	5100	5320	0.60	1.68	109
B-2	99.10	0.16	0.74	—	1.10	4110	4590	0.61	1.85	109
B-3	98.86	—	1.14	—	1.10	3390	4190	0.61	1.95	110
B-4	99.24	—	0.32	0.44	1.10	2620	2790	0.60	1.98	110
B-5	99.37	—	—	0.63	1.10	1630	2520	0.63	2.00	110

Particle size of microballoon A = 15~40 μm
Particle size of microballoon B = 400~500 μm
Particle size of microballoon C = 1500~2500 μm

ニウムの添加量が増加した場合には10gでは完全反応しないため今回の検討からは除外した。試料爆薬Aのアルミニウムの添加量と衝撃波エネルギー、バブルエネルギー及び爆速の関係をFig. 2に示す。

試料爆薬Bは爆速のみを2520 m/sから5320 m/s(50 mm φ)の範囲で変化させ、衝撃波エネルギー及び弾動臼砲値を一定に保ちながらバブルエネルギーは比較的变化の少ない試料として使用した。試料爆薬Bの爆速と衝撃波エネルギー及びバブルエネルギーの関係をFig. 3に示す。

2.3 振動測定方法

発破振動の測定概略をFig. 4に示す。

振動測定は水中爆発実験池の中心(爆源)から40, 80, 155 mの3測点において地盤振動の変位速度をGeospace社製動電型速度計, GS-11D(固有周波数4.5 Hz, 感度0.26 V/cm/s)を用いて、水平方向として爆源に対して直角方向(X成分)と爆源方向(Y成分)の2成分と鉛直方向(Z成分)の計3成分を測定した。速度計は地表から30cmの位置に石こうで固定した。

測定データはTEAC社製データレコーダ, MR-

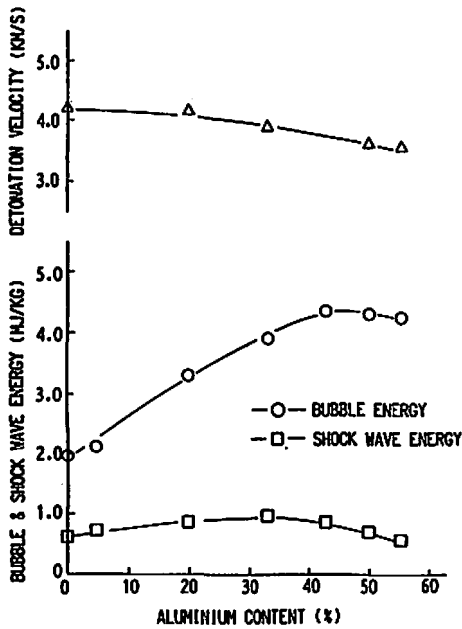


Fig. 2 Variation of bubble energy, shock wave energy and detonation velocity with aluminium content for sample explosives A.

30 (DC~10 KHz) に記録した。解析は Advantest 社製 デジタルスペクトラムアナライザー、TR 9402 (DC~100 KHz) により A-D 変換し、振動速度のピーク値を算出し、あわせて周波数分析を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 バブルエネルギーと地盤振動の相関

振動測定の結果において X, Y, Z 各成分の傾向はほぼ一致しており、振動値としての考察は各成分を総合的に考慮したベクトル振動速度を用いて行う。ベク

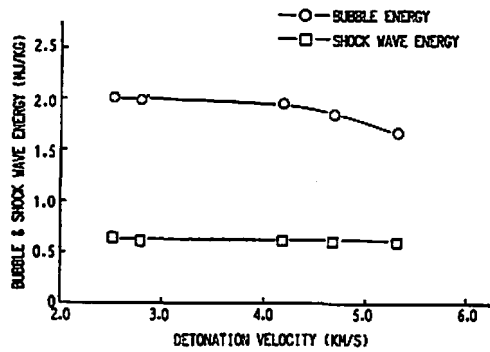


Fig. 3 Variation of bubble energy and shock wave energy with detonation velocity for sample explosives B.

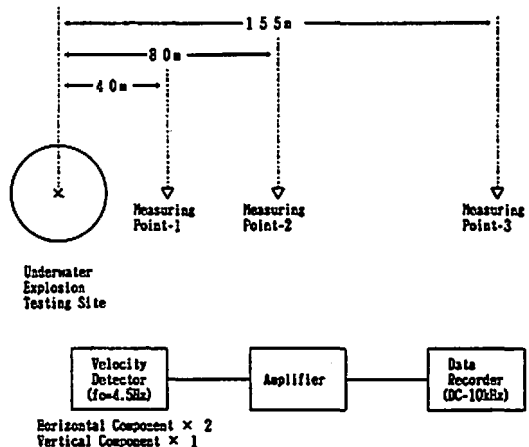


Fig. 4 Schematic diagram of measuring system for ground vibration.

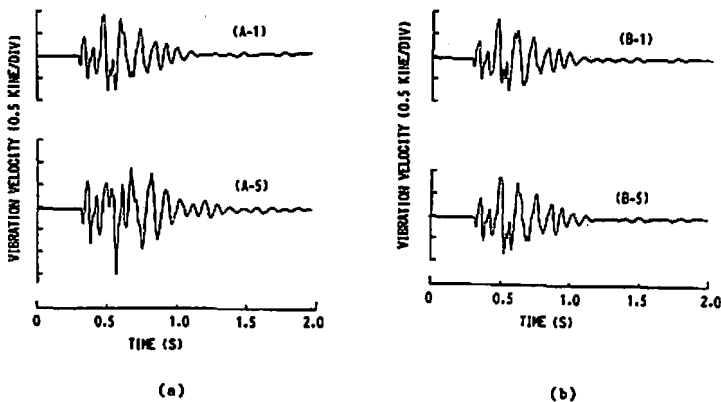


Fig. 5 Typical waveforms of vibration velocity for (a) sample explosives A and (b) sample explosives B at measuring point 1; vertical component.

トル振動速度(V)は $V = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ により計算した値である。

試料爆薬Aを用いた場合の代表的な振動速度波形として、アルミニウムを添加していない試料爆薬A-1とアルミニウムを添加した最もバブルエネルギーの大きい試料爆薬A-5の測定結果をFig. 5, aに示す。アルミニウムの添加(バブルエネルギーの増加)により振動速度のピーク値は増加している。なお、周波数分析の結果は、卓越周波数が10Hz前後であり、各波形共に明らかな差は見られなかった。

振動とバブルエネルギーの関係をFig. 6(測点1)、Fig. 7(測点3)に示す。各測点において振動はバブルエネルギーの増加と共にほぼ直線的に増加することが

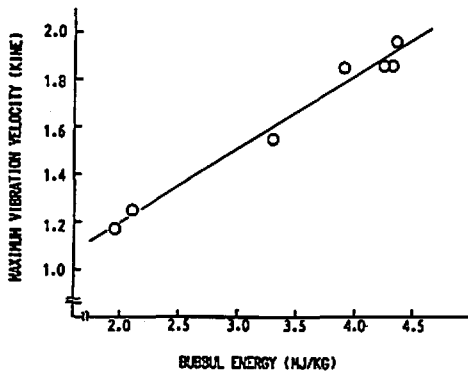


Fig. 6 Correlation between maximum vibration velocity and bubble energy for sample explosives A at measuring point 1.

示された。その振動の増加率はバブルエネルギーが1.95 MJ/kgから4.35 MJ/kgになった場合、測点1では1.17 cm/sから1.96 cm/sに、測点3では0.36 cm/sから0.48 cm/sに増加した。振動と衝撃波エネルギーの関係をFig. 8に示す。衝撃波エネルギーの変化は0.54 MJ/kgから0.94 MJ/kgであり、バブルエネルギーと比較すれば小さい変化範囲であるが、衝撃波エネルギーがほぼ一定の場合にも振動値には大きな違いがあり、振動と衝撃波エネルギーには相関がみられない。

次に、アルミニウムを含有していない爆薬(試料爆薬A-1)を用いて、薬量を変化させてバブルエネルギーと振動を測定した。

薬量を変化させた場合の単位薬量当たりのバブルエネルギーは、100 gから500 gの範囲ではほぼ一定である。アルミニウムの添加量増加によるバブルエネルギーの増加に伴う振動と、薬量増加によるバブルエネルギーの増加に伴う振動を比較するために、バブルエ

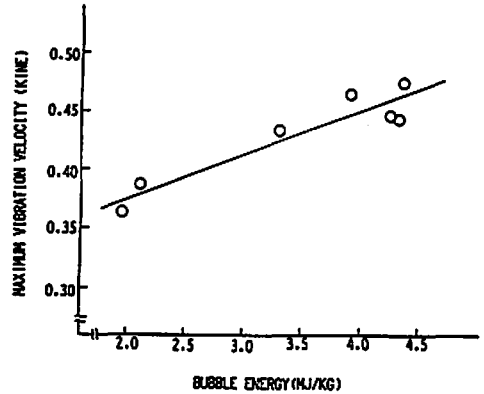


Fig. 7 Correlation between maximum vibration velocity and bubble energy for sample explosives A at measuring point 3.

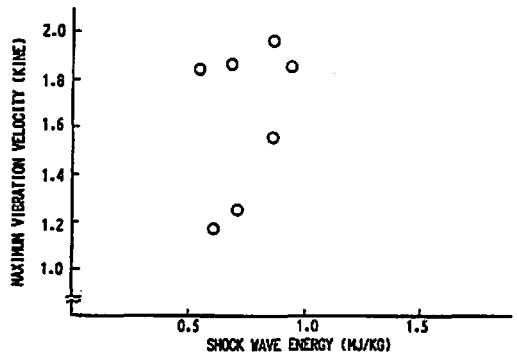


Fig. 8 Correlation between maximum vibration velocity and shock wave energy for sample explosives A at measuring point 1.

ネルギーを単位薬量当たりのエネルギーではなく、バブルエネルギーの絶対量で評価してみる。バブルエネルギーの絶対量(単位MJ)と振動(測点1)の関係をFig. 9に示す。

薬量増加とアルミニウムの添加量増加によるバブルエネルギーの絶対量の増加に伴う振動の増加は同様な傾向を示しているが薬量増加による振動の増加の方が、アルミニウムの添加量増加による振動の増加よりもわずかに大きくなっている。これは同じバブルエネルギーの絶対量であっても、振動として放出される割合が異なっていることによるものであり、アルミニウムの添加量を増加して得られたバブルエネルギーの増加は、振動に対する寄与率が低いと考えられる。その原因については爆薬の反応速度の差異等の影響が考えられるが、その究明については今後より詳細な測定が必要とされる。

3.2 爆速と地盤振動の相関

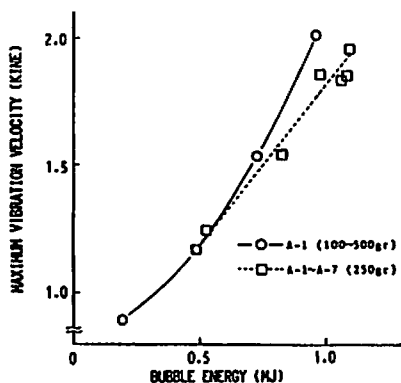


Fig. 9 Correlation between maximum vibration velocity and absolute bubble energy at measuring point 1; Solid line indicates the variation of maximum vibration velocity with charge weight (sample explosives A-1), dotted line indicates the variation of maximum vibration velocity with aluminium content (sample explosives A)

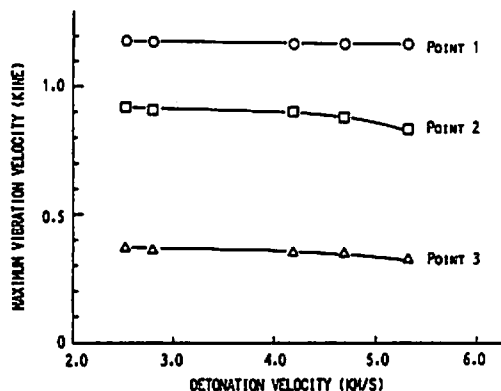


Fig. 10 Correlation between maximum vibration velocity and detonation velocity for sample explosives B.

試料爆薬Bを用いた場合の代表的な振動速度波形として、最も高爆速の試料爆薬B-1と最も低爆速の試料爆薬B-5の測定結果をFig. 5. bに示す。爆速の大幅な変化に関わらず振動速度のピーク値はほぼ一定である。なお、周波数分析の結果についても卓越周波数が10Hz前後であり、各波形共にほぼ同一であった。

各測点における振動と爆速の関係をFig. 10に示す。各測点において爆速が2520 m/sから5320 m/sの範囲で変化しているにも関わらず、振動はほとんど変化がなく、むしろ爆速の増加と共にわずかに減少することが示された。爆源から近い測点1では、爆速の変化にも関わらずほぼ一定であると言える程度の減少傾向であるが、測点2, 3においては、特に高爆速領域において明確な減少傾向がみられる。又、測点2, 3での爆速の増加による振動の減少傾向はFig. 3に示した試料爆薬Bの爆速の増加によるバブルエネルギーの減少傾向とよく一致しており、Fig. 10に見られる爆速の増加による振動の減少傾向は、爆速の増加によるものではなく、むしろバブルエネルギーの減少によるものと考えられる。従って、振動と爆速には相関がみられず、むしろ、試料爆薬Bにおいても振動はバブルエネルギーに強い相関関係があるといえる。

4. 結 論

発破振動と爆薬の諸特性の相関関係を検討するため、爆薬の特性を個々に切り離し、それぞれの特性値と振動との相関関係を調べた。バブルエネルギーと爆速を広範囲に変化させ、その他の特性値をほぼ一定にコントロールした爆薬を用いて検討した結果、発破振動は爆薬の諸特性のうち、バブルエネルギーに強く相関しており、爆速及び衝撃波エネルギーには相関関係が見られないことがわかった。本報告では、発破の形態が水中発破であり、上記の結論は水中発破特有の現象であることも考えられるため、今後は通常最もよく実施されている岩掘削発破においても検討していきたい。

文 献

- 1) 日本トンネル技術協会「トンネル爆破技術指針」p. 142 (1982)
- 2) 日本トンネル技術協会「硬岩の低振動・低騒音掘削に関する調査研究報告書」p. 135(1978)
- 3) 加藤幸夫, 服部勝英, 鳥居彰夫, 工業火薬秋季研究発表会要旨, p. 53(1989)
- 4) 加藤幸夫, 服部勝英, 鳥居彰夫, 工業火薬秋季研究発表会要旨, p. 55 (1989)
- 5) R. H. Cole, "Underwater Explosions", Princeton University Press (1948)
- 6) G. Bjarnholt, R. Holmberg, 6 th Symp. Int'l on Detonation, P. 442, ACR-221, Office of Naval Research (1976)
- 7) G. Bjarnholt, Propellant and Explosives, 8, 67, (1980)

Correlation Between Ground Vibration and Performances of Explosives

—Ground Vibration by Underwater Explosion—

by Koichi KUROKAWA*, Kenji HASHIMOTO*, Minoru KAWAMURA*
Yukio KATO*

It is well known that ground vibration by blasting is mainly related to a distance and charge weight. However, it is not known the correlation between ground vibration and performances of explosives ; for example, shock wave energy, bubble energy, detonation velocity and ballistic mortar value etc.

We used two types of sample explosives. One is an aluminized emulsion explosive whose bubble energy is varied from 1.95 to 4.35 MJ/kg and other performances are maintained nearly constant. The other is an emulsion explosive with different size of microballons whose detonation velocity is varied from 2520 to 5320 m/s and other performances are maintained nearly constant. We measured the ground vibration caused by underwater explosion of sample explosives, and investigated the correlation between ground vibration and performances of explosives.

As a result, it is shown that vibration velocity has the strong correlation with bubble energy. Vibration velocity increases proportionally with the increase of bubble energy. For example, vibration velocity is increased from 1.17 to 1.96 cm/s when bubble energy is increased from 1.95 to 4.35 MJ/kg.

Vibration velocity has no correlation with detonation velocity and shock wave energy. For example, vibration velocity remains almost constant even when detonation velocity is varied from 2520 to 5320 m/s.

(*Chemicals & Explosives Laboratory, Nippon Oil & Fats CO., Ltd.

82 Nishimon, Taketoyo-cho, Chita-gun, Aichi-Ken 470-23)
