

Table 1 Composition and performances 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)	Ballistic Mortar Value (%TNT)
	Emulsion Matrix	Aluminium	Microballoon		25mmφ	50mmφ			
A-2	94.15	4.76	1.09	1.14	3390	4170	0.90	2.10	120
A-3	79.90	20.00	0.91	1.22	3360	4140	1.08	3.30	135
A-4	56.91	33.33	0.76	1.38	3100	3860	1.19	3.90	130
A-5	56.90	42.86	0.65	1.47	2890	3750	1.09	4.35	98
A-6	49.43	50.00	0.57	1.55	2690	3610	0.87	4.32	87

Average particle size of aluminium = 30μm

Particle size of microballoon = 400~500μm

Table 2 Composition and performances 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 (%TNT)
	Emulsion Matrix	Microballoon				25mmφ	50mmφ			
		A	B	C						
B-1	99.60	0.40	-	-	1.10	5100	5320	0.78	1.68	109
B-2	99.10	0.16	0.74	-	1.10	4110	4690	0.80	1.85	109
B-3	98.86	-	1.14	-	1.10	3390	4190	0.80	1.95	110
B-4	99.24	-	0.32	0.44	1.10	2620	2790	0.79	1.98	110
B-5	99.37	-	-	0.63	1.10	1630	2520	0.82	2.00	110

Particle size of microballoon A = 15~40μm

Particle size of microballoon B = 400~500μm

Particle size of microballoon C = 1500~2500μm

少ないものである。

なお、衝撃波エネルギーが前報³⁾と異なっているが、その原因はトルマリンゲージの校正によるものであり、その後の検討の結果、本報告のエネルギー値が正しいことが判明した。

2.2 発破方法

発破はFig.1に示した高さ3m、厚さ15cmのコングリート壁に囲まれた片面開放の直径2.5m、長さ4.5mの半円筒形爆発試験ドーム中央の砂上に試料爆薬を設置して起爆した。試料爆薬は薬量100g、形状は25mmφ円柱状に紙巻包装したものである。

2.3 発破音測定方法

発破音の測定概略をFig.1に示す。爆源から距離18m(測点1)、36m(測点2)の位置に、リオン社製インパルス精密騒音計NA-61とリオン社製低周波音レベル計NA-17を設置し、それぞれFLAT特性(10~20000

Hz平坦特性)とSPL特性(1~1000Hz平坦特性)による音圧波形をテイアック社製データレコーダMR-30(DC~10KHz)に記録した。

解析は記録したデータを再生し、騒音計についてはFLAT特性とA特性、低周波音レベル計についてはSPL特性とLSL特性をリオン社製レベルレコーダLR-20に記録した。動特性は全てFast特性である。又、アドバンテスト社製デジタルスペクトラムアナライザTR9402を用いて、音圧波形の周波数分析を行った。なお、便宜上騒音と低周波音を合わせて発破音と称する。

3. 実験結果

解析の結果、測点1ではインパルス精密騒音計の上限である130dBを超えるものがあつた。従つて、本報では測点2のデータを用いて検討した。

3.1 試料爆薬A

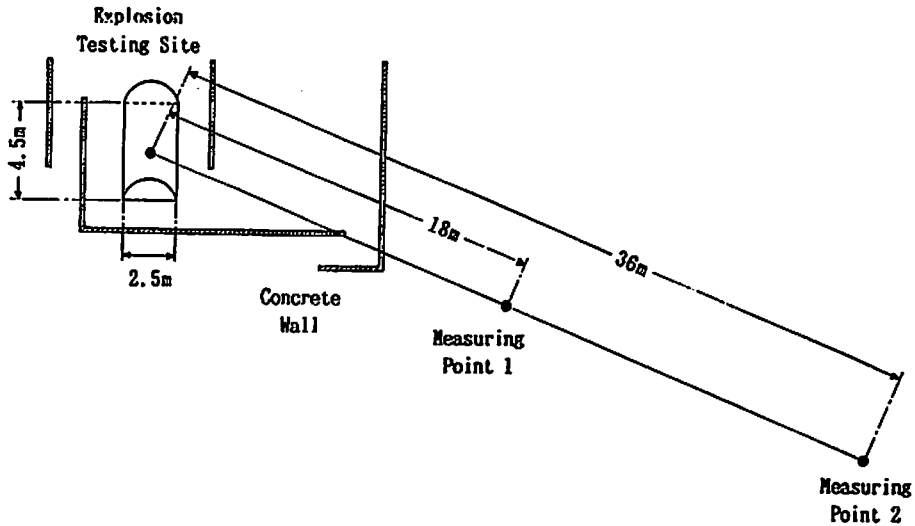


Fig. 1 Schematic diagram of blast noise measurements.

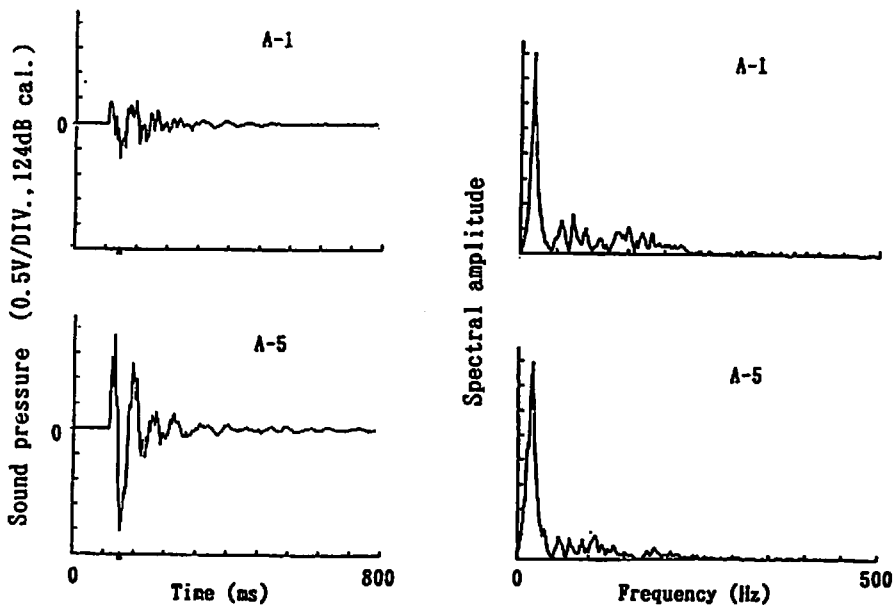


Fig. 2 Typical waveforms of sound pressure and frequency spectrum of low frequency blast noise for sample explosives A.

試料爆薬Aのうち、パブルエネルギーが最小の爆薬A-1と最大の爆薬A-5の低周波音の音圧波形及びその周波数分析波形をFig.2に示す。パブルエネルギーの増加に従って音圧の上昇がみられる。周波数分析結果では、卓越周波数がいずれも16Hz程度であり、明確な差はみられなかった。

パブルエネルギーと発破音の関係をFig.3に示す。騒音計のFLAT特性、A特性及び低周波音レベル計

のSPL特性、LSL特性の全てがパブルエネルギーの増加に従ってほぼ直線的に増加する傾向がみられ、発破音とパブルエネルギーの明確な相関が示された。その増加量は、パブルエネルギーが1.95MJ/kgから4.35MJ/kgまで、2.2倍増加した場合、騒音計ではFLAT特性で9.5dB、A特性すなわち騒音レベルで5.8dB増加し、低周波音レベル計ではSPL特性で9.7dB、LSL特性で7.9dB増加した。

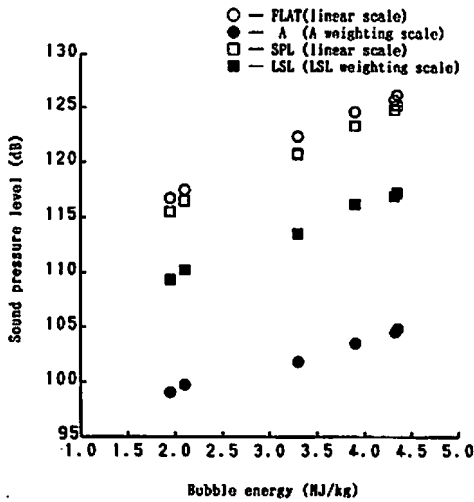


Fig. 3 Correlation between sound pressure level and bubble energy for sample explosives A.

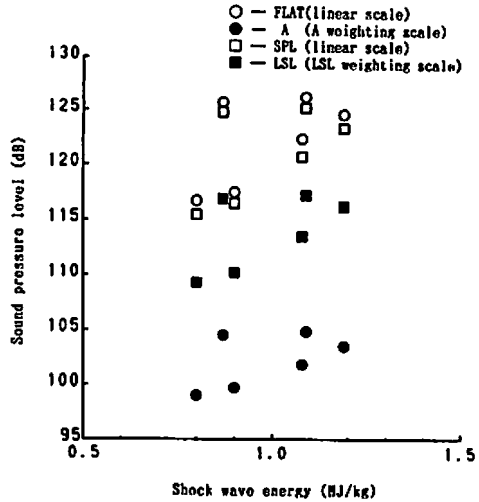


Fig. 4 Correlation between sound pressure level and shock wave energy for sample explosives A.

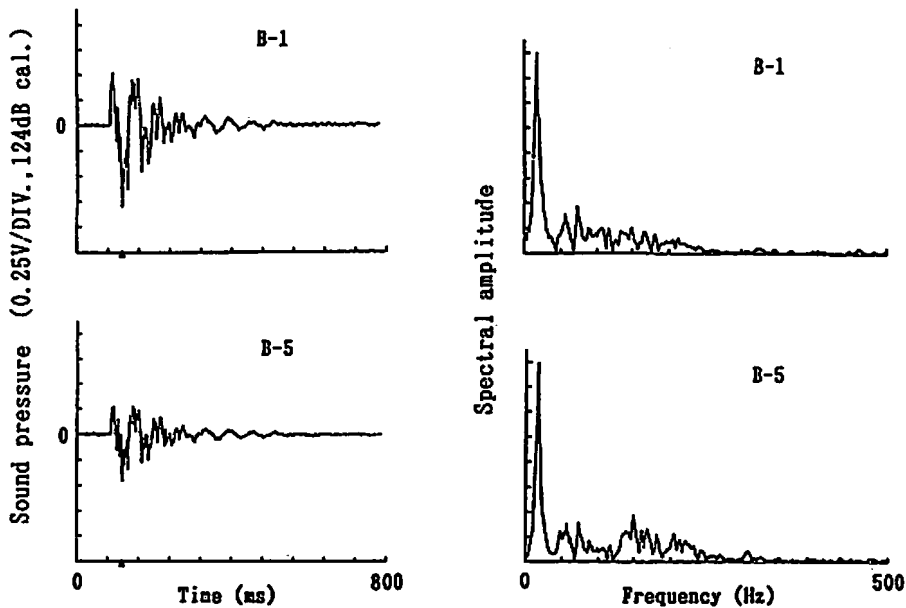


Fig. 5 Typical waveforms of sound pressure and frequency spectrum of low frequency blast noise for sample explosives B.

衝撃波エネルギーと発破音の関係をFig.4に示す。衝撃波エネルギーの変化は0.80MJ/kgから1.19MJ/kgであり、パルスエネルギーと比べて小さい変化範囲であるが、衝撃波エネルギーがほぼ同一の場合でも、騒音、低周波音共に大きな違いがあることから、発破音と衝撃波エネルギーには相関がみられない。

3.2 試料爆薬B

試料爆薬Bのうち、爆速が最大の爆薬B-1と最小の

爆薬B-5の低周波音の音圧波形及びその周波数分析波形をFig.5に示す。爆速の増加に従って音圧の上昇がみられる。周波数分析結果では、卓越周波数がいずれも16Hz程度であり、明確な差は見られなかった。以上の試料爆薬A及びBの周波数分析結果から、発破音の周波数成分は、爆薬の特性の変化にはほとんど影響されないことが示された。

爆速と発破音の関係をFig.6に示す。騒音計の

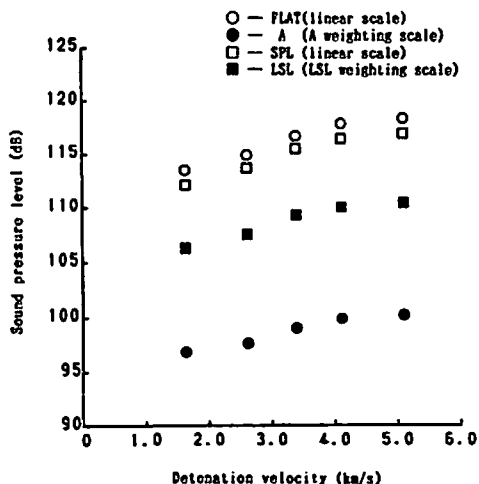


Fig. 6 Correlation between sound pressure level and detonation velocity for sample explosives A.

FLAT 特性, A 特性及び低周波音レベル計の SPL 特性, LSL 特性の全てが爆速の増加に従ってほぼ直線的に増加する傾向がみられ, 発破音と爆速の明確な相関が示された。その増加量は, 爆速が 1630m/s から 5100m/s まで 3.1 倍増加した場合, 騒音計では FLAT 特性で 4.8dB, A 特性(騒音レベル)で 3.4dB 増加し, 低周波音レベル計では SPL 特性で 4.8dB, LSL 特性で 4.1dB 増加した。

4. 考 察

以上の実験結果より, 砂上発破に伴い発生する発破音はパブルエネルギーと爆速のいずれにも強く相関していることが示された。その増加量は, 試料爆薬 A では, パブルエネルギーが 2.2 倍増加した場合, FLAT 特性で 9.5dB, SPL 特性で 9.7dB 増加した。それに対し, 試料爆薬 B では, 爆速が 3.1 倍増加した場合, FLAT, SPL 特性共に 4.8dB 増加した。すなわち, 発破音に与える影響度は爆速よりもパブルエネルギーの方が大きい。

しかしながら, 上記の結果は試料爆薬 A と B を区別して考察したものである。又, 試料爆薬 A は, アルミニウムの添加量の増加に伴ってパブルエネルギーは 2.2 倍に増加しているが, 逆に爆速は 0.8 に減少している

にも関わらず, Fig. 3 に示したパブルエネルギーと発破音の関係には, 爆速と衝撃波エネルギーの若干の変化による影響は含まれていない。同様に, 試料爆薬 B についても, 気泡保持剤の粒径が小さくなるのに伴って爆速は 3.1 倍に増加しているが, 逆にパブルエネルギーは 0.8 倍に減少しているにも関わらず, Fig. 6 に示した爆速と発破音の関係には, パブルエネルギーと衝撃波エネルギーの若干の変化による影響は含まれていない。

そこで, これらの影響も含めた上で, 爆薬の各々の特性値が発破音にどの程度寄与しているかを考察するため, 重回帰分析を行った。重回帰分析には発破音のもつ物理的特性を検討するため, 平坦な周波数特性である騒音計の FLAT 特性及び低周波音レベル計の SPL 特性の結果を用いた。目的変数の騒音計の FLAT 特性 [FLAT (dB)], 低周波音レベル計の SPL 特性 [SPL (dB)] に対する説明変数としては, 気象条件や地形条件等様々なものが考えられるが, 本実験ではこれらの条件はできるだけ一定にし, ここでは純粋に爆薬の諸特性と発破音の相関関係を分析するために, 爆速 [Dv (km/s)], パブルエネルギー [Eb (MJ/kg)], 衝撃波エネルギー [Es (MJ/kg)] の 3 特性のみを説明変数とした。重回帰式の推定は, 発破音がこれら 3 特性に制御され直線的に増加するものと仮定し, 次の (1), (2) 式に示すものとした。

$$\text{FLAT} = a \cdot Eb + b \cdot Es + c \cdot Dv + d \quad (1)$$

$$\text{SPL} = i \cdot Eb + j \cdot Es + k \cdot Dv + l \quad (2)$$

以上の条件で重回帰分析を行った。FLAT 特性の分析結果を Table 3 に, SPL 特性の分析結果を Table 4 に, 得られた回帰式を次の (3), (4) 式に示す。

$$\text{FLAT} = 4.38 \cdot Eb + 0.90 \cdot Es + 1.87 \cdot Dv + 101.61 \quad (3)$$

$$\text{SPL} = 4.60 \cdot Eb - 0.70 \cdot Es + 1.75 \cdot Dv + 100.78 \quad (4)$$

標準偏回帰係数とは各変数を平均 0, 分散 1 になるように基準化したもので, 各説明変数の測定単位によって左右されることを取り除いたものである。従って, 各説明変数の標準偏回帰係数を比較することにより, 目的変数への寄与の大小を比較できる。Table 3(a) による

Table 3(a) Multiple regression analysis (blast noise).

Predictor variables	Partial regression coefficient	standard partial regression coefficient	t value
Eb	4.3833	1.0467	33.546 ^{***}
Es	0.0903	0.0030	0.099
Dv	1.8691	0.3763	18.351 ^{***}

Table 3(b) Variance analysis (blast noise).

Fluctuations	Sum of squares	Degree of freedom	Unbiased variance	Variance ratio
Regression	189.459	3	63.153	889.69 ^{***}
Residual	0.426	6	0.07098	
total	189.885	9		

Table 3(c) Correlation coefficient (blast noise).

Multiple correlation coefficient	0.9989
Coefficient of determination	0.9978
Multiple correlation coefficient adjusted for the degree of freedom	0.9983

り、標準偏回帰係数は E_b が最も大きく寄与度が高いことが示され、続いて D_v 、 E_s の順となっている。その比率は105:38:0である。 t 値は各説明変数が目的変数に対して影響を与えるかどうかを検定するために求めたものである。検定の結果、 E_b と D_v は高度に有意であったのに対し、 E_s は5%水準でも有意でなかった。即ち、 E_b と D_v はFLAT特性に強い影響を与えているのに対し、 E_s はほとんど影響を与えていない。従って、 E_s は標準偏回帰係数が小さいことからみても、FLAT特性にほとんど寄与していない。

分散分析では、回帰平方和と残差平方和の分散比を検定することにより、目的変数と説明変数の間の直線関係がわかる。検定の結果、Table 3(b)に示したように高度に有意であり、FLAT特性と E_b 、 D_v 、 E_s の

間の直線関係が明確に示された。

重相関係数、寄与率、自由度調整済重相関係数は、実験で得られた測定値と重回帰式より算出される予測値との相関関係の強さを示すものであり、重回帰式の有効性の尺度である。本分析結果では、Table 3(c)に示したようにいずれも0.99以上の値を示していることから、重回帰式(3)が妥当であるといえる。

Table 4の低周波音レベル計のSPL特性の重回帰分析結果についても、騒音計のFLAT特性とほぼ同様の結果が得られ、 E_b 、 D_v 、 E_s の順に寄与度が高く、その比率は107:34:2である。

次に、以上の分析結果から得られた重回帰式を、本実験で用いたエマルジョン系以外の爆薬についても使用できることを確認するため、ダイナマイト系の3種

Table 4(a) Multiple regression analysis (low frequency blast noise).

Predictor variables	Partial regression coefficient	standard partial regression coefficient	t value
E_b	4.5977	1.0657	20.774 ^{***}
E_s	-0.6953	-0.0222	-0.448
D_v	1.7525	0.3424	10.143

Table 4(b) Variance analysis (low frequency blast noise).

Fluctuations	Sum of squares	Degree of freedom	Unbiased variance	Variance ratio
Regression	200.324	3	66.775	326.94 ^{***}
Residual	1.225	6	0.20424	
total	201.549	9		

Table 4(c) Correlation coefficient (low frequency blast noise).

Multiple correlation coefficient	0.9970
Coefficient of determination	0.9939
Multiple correlation coefficient adjusted for the degree of freedom	0.9954

Table 5 Performances of sample explosives C and comparison between calculated and measured blast noise and low frequency blast noise.

Sample Explosives	Detonation Velocity 25mmφ(m/s)	Shock Wave Energy (MJ/kg)	Bubble Energy (MJ/kg)	blast noise FLAT (dB)		low frequency blast noise SPL (dB)	
				Calculation	Measurement	Calculation	Measurement
C-1	2520	0.76	2.30	117.1	117.0	115.2	115.3
C-2	2780	1.08	2.34	118.0	117.9	115.7	115.8
C-3	6000	0.85	1.98	122.3	122.0	119.8	119.6

の爆薬について本実験と同一の条件で砂上発破を行った。その際の発破音の実測値と回帰式から算出される予測値を比較した。その結果とダイナマイト系爆薬の諸特性値を Table 5 に示す。予測値と実測値の差は FLAT 特性で最大 0.3dB, SPL 特性で 0.2dB であった。従って、本分析で得られた重回帰式はエマルジョン系以外の爆薬に関しても適用できるものと考えられる。

5. 結 言

爆薬の諸特性が発破音に与える影響を検討するため、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、砂上発破の形態で検討した。

発破音は騒音、低周波音共にバブルエネルギー及び爆速に強く相関しており、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。重回帰分析の結果、

バブルエネルギーが最も影響度合が高く、爆速の 3 倍の寄与度であった。又、その相関関係は、エマルジョン爆薬以外のダイナマイト系の爆薬にも適合していることがわかった。

本報告では、発破の形態が爆薬の爆発によって直接大気が衝撃される砂上発破であり、今後は一般に広く用いられている水中発破や岩掘削発破についても検討して行きたい。

文 献

- 1) 関 順一, 井上博之, 前田技術研究所報, 24, 58(1983)
- 2) 名和小太郎, 工業火薬, 24(5), 47(1963)
- 3) 黒川孝一, 橋本賢二, 川村 実, 加藤幸夫, 工業火薬, 52(1), 35(1991)
- 4) 奥野忠一他, 「多変量解析法」(1989), 日科技連

Correlation between blast noise and performances of explosives

Blast noise by plaster shooting

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

It is not known the correlation between blast noise 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 4.35MJ/kg and other performances are maintained nearly constant. The other is an emulsion explosive with microballoons of different size whose detonation velocity is varied from 1630 to 5100 m/s and other performances are maintained nearly constant. We measured the blast noise caused by plaster shooting of sample explosives, and investigated the correlation between blast noise and performances of explosives.

It is shown that blast noise has the strong correlation with bubble energy and detonation velocity. Blast noise increases proportionally with the increase of bubble energy and detonation velocity. For example, blast noise is increased 9.5 dB (FLAT) and low frequency blast noise is increased 9.7 dB (SPL) when bubble energy is increased from 1.95 to 4.35 MJ/kg. Both blast noise and low frequency blast noise are increased 4.8 dB (FLAT, SPL) when detonation velocity is increased from 1630 to 5100 m/s. Blast noise has no correlation with shock wave energy.

As a result of multiple regression analysis, it is shown that the degree of effect of bubble energy is about three times greater than that of detonation velocity, and shock wave energy does not affect blast noise. It is shown that the correlation between blast noise performances of explosives is also applicable to gelatine dynamites.

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

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