

発破音の感覚的大きさについて

佐々宏一*, 岡本昌直**, 伊藤一郎*

騒音計とデータレコーダとを用いて発破現場で集録した8種類の発破音を実験室で再生し、これと連続正弦波音とを1対比較法で被験者に聞き比べさせ、発破音と同じ大きさの音と聞こえる連続正弦波音の音圧レベルを求めた。ついで、その発破音を騒音計の動特性、したがって、実効値を求める際の平均時間を変えて測定し、どの特性で測定した騒音レベルが発破音の感覚的大きさを最も良く示しているかについて検討した。その結果、発破音と同じ大きさと聞こえる連続正弦波音の音圧最高値の音圧レベルは発破音のそれよりも3~14dB小さく、その差は発破音の継続時間が長くなるほど小さくなる傾向にあること、および、騒音計のImpulse特性で測定した騒音レベルが発破音の感覚的大きさを最も良く示していることが明らかとなった。

1. 緒言

発破作業が人家の近傍で実施される機会が多くなってきているという状況と、振動・騒音公害に対する住民の意識が高まっているという社会的背景を考えれば、発破騒音の感覚的大きさについて早急に検討しておく必要があると考えられる。一方、工場騒音や交通騒音のように、連続騒音か、それとも継続時間が比較的長い間欠騒音に対しては、すでにその測定法が定められている。ところが、発破騒音の場合は、発破法によって騒音の継続時間や間欠時間間隔や回数が変化し、その波形も振幅が急激に変化する衝撃的な波形であるから、その測定方法も未だ確立していないという状況にある。そこで今回は、現地で録音した8種類の発破騒音を対象として、発破騒音の感覚的大きさに関連する1, 2の基礎的な問題について検討したので、それらの結果について報告する。

2. 騒音レベルと騒音計の動特性

音圧レベル (Sound Pressure Level) は次式で示される。

$$\text{音圧のレベル (dB)} = 20 \log_{10}(P/2 \times 10^{-4}) \quad (1)$$

ここに P は音波の音圧 (単位は μbar または dyne/cm^2) である。音の感覚的大きさはたとえ音圧のレベルが等しくても、音の周波数によって変化する。したがって、音の感覚的大きさ、すなわち、音の大きさのレベル (Loudness Level) を測定することを目的として作られている騒音計は、その内部に、A, B, C

特性として知られている聴感補正回路が組み込まれている。このような騒音計で測定されるレベルを騒音レベル (Noise Level) と称し、使用した特性に応じて、 $\text{dB}(A)$, $\text{dB}(B)$, $\text{dB}(C)$ という単位で示される。音の感覚的大きさは音波の音圧の最高値ではなく、音圧の実効値に対応している。音圧の実効値は音波の音圧を $P(t)$ とすると(2)式で示される。

$$\text{実効値} = \sqrt{\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} P(t)^2 dt} \quad (2)$$

音波が連続正弦波の場合には、平均時間 $(t_2 - t_1)$ が1周期より長ければ実効値は振幅、すなわち、最高値の $1/\sqrt{2}$ となる。しかし、発破音のように、音圧の振幅が時間とともに変化し、継続時間も短い衝撃的な音の場合には、実効値は平均時間によって変化し、平均時間が長くなるにつれて小さくなる。このことはいいかえれば、音圧の振幅が等しい音波の場合には、音の継続時間が平均時間より短かければ、音の継続時間が短くなればなるほど実効値が小さくなることを示している。上記のように、音の感覚的大きさは音圧の実効値に関係しており、平均時間は聴感系の神経成分の積分時間によって規定されている。従来の研究により、継続時間が1秒以下である衝撃音に対しては、継続時間が短くなるほど鈍感になることがわかっている。したがって、精密騒音計では、その動特性、すなわち、平均時間が変えられるようになっているものもある。この場合、動特性のFastの平均時間は200ms, Slowは500msである。

今回の実験には Brüel & Kjær 社の衝撃精密騒音計 (2209型) を使用したが、この騒音計は上記の

昭和53年9月1日受理

*京都大学工学部資源工学教室 〒606 京都市左区吉田本町

**特許庁 (当時学生) 〒100 東京都千代田区麹町9-4-3

Fast, および Slow 特性の他に 衝撃音測定用の 動特性である平均時間が 35ms の Impulse 特性と、音圧の最高値が測定できる Peak 特性とを備えている。

3. 実験に用いた発破音

種々の条件の発破を行なった場合に発生した発破音を Brüel & Kjør 社の衝撃精密騒音計を用いてデータレコーダに録音し、それを実験室で再生して実験

Table 1 Noise number and blasting condition

Noise number	Blasting condition
1	Simultaneous blasting
2	Simultaneous blasting
3	Milli-second delay blasting of 4 delays
4	Milli-second delay blasting of 4 delays
5	Milli-second delay blasting of 4 delays
6	Deci-second delay blasting of 3 delays
7	Deci-second delay blasting of 4 delays
8	Deci-second delay blasting of 5 delays



Fig. 1 Overpressure trace of blast noise No.1

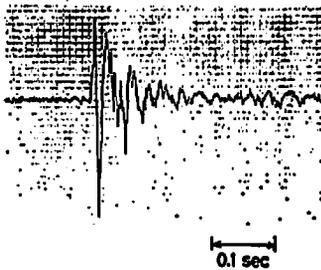


Fig. 2 Overpressure trace of blast noise No.2

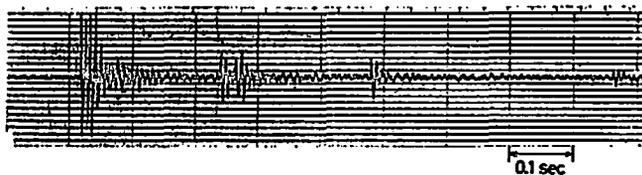


Fig. 6 Overpressure trace of blast noise No.6

に供した。実験に供した発破音を測定したときの発破条件を Table 1 に示し、各条件の発破により得られた発破音の波形を Fig. 1 ~ Fig. 8 に示す。

実験は後述するように、現地で集録した発破音を実験室で再生し、これと連続正弦波音とを聞き比べるという方法で行なったので、あらかじめ、再生された発破音の周波数分析を行なった。その 1 例として、条件 2 の斉発破に起因する発破音と、条件 6 の DS 発破に起因する発破音との周波数分析結果を Fig. 9 および Fig. 10 に示す。これらの図より、発破音は多くの周波数成分の音から成り立っていることがわかる。なお、実際の発破音は 100Hz 以下の低周波数成分をか

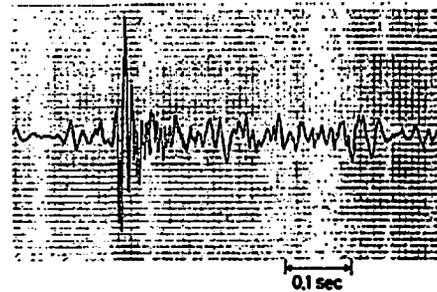


Fig. 3 Overpressure trace of blast noise No.3

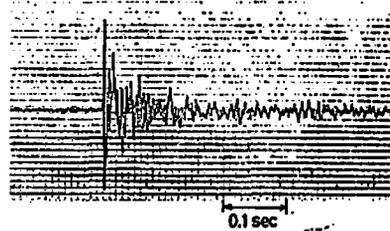


Fig. 4 Overpressure trace of blast noise No.4

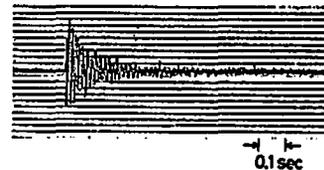


Fig. 5 Overpressure trace of blast noise No.5

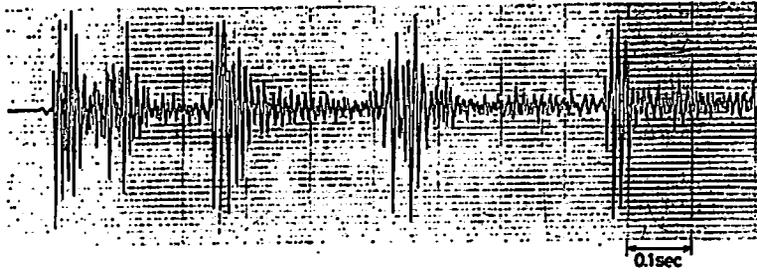


Fig. 7 Overpressure trace of blast noise No.7

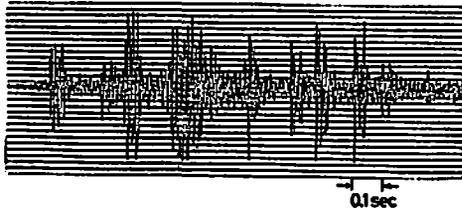


Fig. 8 Overpressure trace of blast noise No.8

発破音の感覚的大きさ、および、発破音の騒音レベルが、実効値を求ゆる際の平均時間の差、すなわち、騒音計の動特性 (Slow, Fast, Impulse) の差によって、どのように変るかを調べる実験は下記のような方法で行なった。

まず、データレコーダに記録されている発破音を、内容積 70l のキャビネットに口径 30cm のウーハー

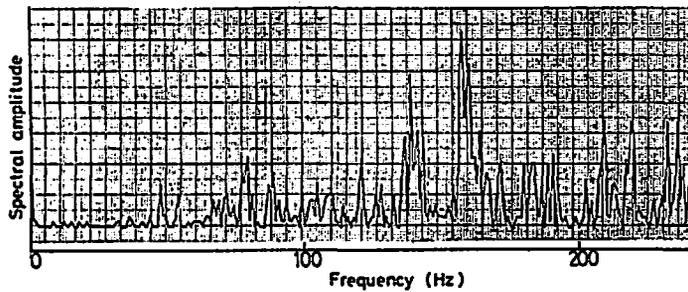


Fig. 9 Frequency spectrum of blast noise No.2

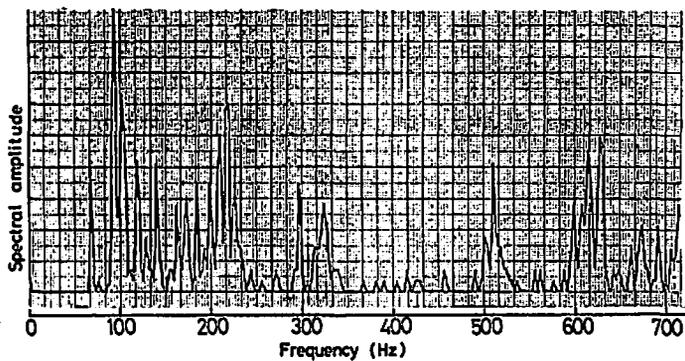


Fig. 10 Frequency spectrum of blast noise No.6

なり含んでいるが、再生された発破音は、Fig. 9 および Fig.10 に示すように、50~60Hz 以下の周波数成分はほとんど出ていない。これは、再生に用いた増幅器とスピーカの特性によるものである。

4. 実験方法

を取り付けたスピーカを用いて再生し、その音の音圧最高値の音圧レベルが所定の値となるように電力増幅器の増幅度を調整する。この場合、実験に使用した精密騒音計はピークホールド機能を有しているので、発破音の音圧最高値の音圧レベルの測定は容易である。

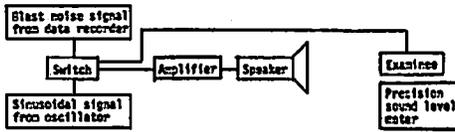


Fig. 11 Configuration of experiment

Table 2 Dominant frequency of respective noise

Noise number	1	2	3	4	5	6	7	8
Dominant frequency (Hz)	300	160	280	223	244	100	200	147

今回は、発破音の音圧最高値の音圧レベルがほぼ 110 dB (C) の場合と 90dB(C) の場合とについて実験を行なった。

実験に際しては、まず、Fig.11 に示すように、発破音が集録されているデータレコーダを駆動することによって、あらかじめその音圧最高値の音圧レベルがほぼ 90dB(C) または 110dB(C) に調整されている発破音を被験者に聞かせ、約 1 秒後にスイッチを発振器の方へ倒して、今聞かせた発破音の卓越周波数の連続正弦波音を聞かせる。そこで被験者は連続音の大きさが先に聞いた発破音の大きさと同じとなるように連続音の音量調節つまみを動かす。このような一連の操作を 8 回くり返して行ない、発破音の大きさと連続正弦波音の大きさが等しくなるように調整させる。

このようにして得られた発破音と同じ大きさに聞こえる正弦波音の音圧最高値の音圧レベルを測定する。ついで、この発破音の騒音レベルを騒音計の動特性を Impulse, Fast, Slow と切り換えて測定し、平均時間の長さによって発破音の騒音レベルがどのように変化するかを測定した。このような測定を発破音の音圧

最高値の音圧レベルが、ほぼ 110dB(C) と 90dB(C) との場合のそれぞれについて、Table 1 に示した 8 条件の発破音について実施した。なお、それぞれの条件の発破音と聞き比べた連続正弦波音の周波数、したがって、それぞれの条件の発破音の卓越周波数を Table 2 に示しておく。

5. 実験結果と考察

発破音の感覚的大きさを求めるための実験は、発破音の音圧最高値がほぼ 110dB(C) の場合については 7 名、ほぼ 90dB(C) の場合については 4 名の被験者に対して行なった。実験結果のうち、まず、発破音の音圧最高値の音圧レベルと、その発破音と同じ大きさに聞こえると判断された連続正弦波音の音圧最高値 (音圧振幅) の音圧レベルおよび両者の差を Table 3 に示す。Table 3 より、斉発破に起因する発破音である発破音 No.1 および No.2 と、MS 発破に起因する発破音である No.3, No.4, No.5 のそれぞれの発破音の感覚的大きさは、音圧最高値がほぼ 10dB 小さい連続音と同じとなり、DS 発破の発破音である No.6, No.7, No.8 のそれぞれの発破音の場合にはほぼ 5dB 小さい連続音と同じ大きさに感じることがわかる。このように、DS 発破に起因する発破音の方が減衰量が小さいのは、DS 発破の発破音は間欠的な性質を有し、かつ、全体的な継続時間が長いことに起因している。

すでに示したように、音の感覚的大きさは音圧の最高値ではなく、音圧の実効値に関係しているが、実効値は衝撃音の場合には平均時間によってかなり変化する。そこで No.1~No.8 のそれぞれの発破音を、騒音計の動特性を Impulse, Fast, Slow の 3 種類に切り換えて測定し、平均時間が 35ms, 200ms, 500ms の場合の実効値を求めた。その結果を示したのが

Table 3 Peak noise levels of blast noise and continuous noise decided as equal loudness

Blast noise number	Noise level dB (C)		Equal loudness attenuation (dB)
	Blast noise	Continuous noise	
1	109.5	100.3	9.2
	91.0	78.0	13.0
2	110.5	99.9	10.6
	92.0	80.8	11.2
3	111.5	103.7	7.8
	92.0	83.5	8.5
4	110.5	97.0	13.5
	89.0	76.7	12.3
5	110.0	102.0	8.0
	90.0	82.3	7.7
6	111.0	105.4	5.6
	91.5	82.5	9.0
7	110.5	107.9	2.6
	91.0	85.3	5.7
8	110.5	107.1	3.4
	90.0	83.8	6.2

Table 4 Effect of meter dynamic characteristics on noise level of blast noise having peak pressure level of about 110 dB(C)

Noise number	1	2	3	4	5	6	7	8
P_{peak} (dB)	109.5	101.5	111.5	110.5	110.0	111.0	110.5	110.5
P_{imp} (dB)	96.0	98.0	99.0	99.0	99.0	100.5	101.5	100.0
P_{fast} (dB)	90.0	92.5	92.5	94.5	95.0	95.0	98.5	97.5
P_{slow} (dB)	85.0	87.0	87.5	89.0	90.0	91.0	97.0	94.5
$P_{imp}-P_{peak}$	-13.5	-12.5	-12.5	-11.5	-11.0	-10.5	-9.0	-10.5
$P_{fast}-P_{peak}$	-19.5	-18.0	-19.0	-16.0	-15.0	-15.5	-12.0	-13.0
$P_{slow}-P_{peak}$	-24.5	-23.5	-24.0	-21.5	-20.0	-20.0	-13.5	-16.0
$P_{fast}-P_{imp}$	-6.5	-5.5	-6.5	-4.5	-4.0	-5.0	-3.0	-2.5
$P_{slow}-P_{imp}$	-11.0	-11.0	-11.5	-10.0	-9.0	-9.5	-4.5	-5.5

Table 5 Effect of meter dynamic characteristics on noise level of blast noise having peak pressure level of about 90 dB(C)

Noise number	1	2	3	4	5	6	7	8
P_{peak} (dB)	91.0	92.0	92.0	89.0	90.0	91.5	91.0	90.0
P_{imp} (dB)	78.5	79.0	80.0	79.0	79.0	80.0	81.5	82.5
P_{fast} (dB)	73.0	74.0	74.0	74.0	74.5	76.0	79.0	80.0
P_{slow} (dB)	69.0	70.0	70.5	71.0	69.0	72.5	76.0	76.0
$P_{imp}-P_{peak}$	-12.5	-13.0	-12.0	-10.0	-11.0	-11.5	-9.5	-7.5
$P_{fast}-P_{peak}$	-18.0	-18.0	-18.0	-15.0	-15.5	-15.5	-12.0	-10.0
$P_{slow}-P_{peak}$	-22.0	-22.0	-21.0	-18.0	-21.0	-19.0	-15.0	-14.0
$P_{fast}-P_{imp}$	-5.5	-5.0	-6.0	-5.0	-4.5	-4.0	-2.5	-2.5
$P_{slow}-P_{imp}$	-9.5	-9.0	-9.5	-8.0	-10.0	-7.5	-5.5	-6.5

Table 4 および Table 5 である。Table 4 および Table 5 には、音圧最高値の音圧レベル (P_{peak}) と、各特性で測定した実効値の音圧レベル (騒音レベル) P_{imp} , P_{fast} , P_{slow} およびこれらの間の差が示してある。Table 4 および Table 5 より、音圧最高値のレベルと音圧実効値のレベルとの差は音の継続時間が長くなるにつれて小さくなっていること、および P_{fast} , P_{slow} と P_{imp} との差も発破音の継続時間が長くなるにつれて小さくなる傾向にあることがわかる。このことは、発破音の場合には最大振幅附近で振幅の変化が激しく、最大振幅が持続しない波形であることと、(2) 式の関係とから理解することができる。さらに、 P_{imp} と P_{slow} との差は、発破音の継続時間が短かいときにはほぼ 10dB であるが、継続時間が長くなると 5dB 程度になることがわかる。なお、一般の簡易騒音計で測定される騒音レベルは Slow 特性の測定値である。

次に、Table 3 に示した発破音の感覚的大きさと

Table 4 および Table 5 に示した各特性で測定した実効値とを対比してみると、発破音の音圧最高値の音圧レベルが 90dB(C) の場合には、感覚的大きさは発破音の継続時間や波形に関係なく、Impulse 特性で測定した騒音レベル、したがって平均時間が 35ms の場合の実効値の音圧レベルとはほぼ一致しているが、発破音の音圧最高値が 110dB の場合には Impulse 特性の測定値よりもやや大きい値となっていることがわかる。しかし、実際に発破騒音が問題となるのは、音圧最高値が 90dB 以下の場合が多いから、発破音の感覚的大きさは Impulse 特性による測定値とはほぼ等しいとみなして差し支えないと考えられる。

6. 結言

現地でデータレコーダに集録した発破音を実験室で再生し、これを連続音と 1 対比較法で被験者に聴き比べさせるという方法を用いて、発破音の感覚的大きさについて検討するとともに、これらの発破音の音圧実効値を平均時間の異なる 3 種の動特性を用いて測定し

た。その結果、発破音の感覚的大きさは、その音圧最高値が発破音の音圧最高値より $5\sim 10\text{dB}$ 小さい連続正弦波音とほぼ同じ大きさに聞こえること、および、発破音の感覚的大きさは、平均時間が 35ms の Impulse 特性で測定した騒音レベルとほぼ一致することが明らかとなった。

なお、今回検討したのは、発破音の感覚的大きさであって、これは発破音の「うるささ」とは別のものであることに注意せねばならない。「うるささ」はたとえ、騒音の感覚的大きさが等しくても、その騒音が連

続音であるか、交通騒音のように継続時間が比較的長い間欠音であるが、それとも発破音のように衝撃的な音であるかによってかなり異なる。したがって、発破音の「うるささ」は感覚的大きさととは別に検討されねばならない事項である。

最後にこの研究は昭和52年度文部省科学研究費（一般 C）、および第7回火薬工業技術奨励会研究助成金の補助を受けて実施したものである。ここに記して感謝する次第である。

Sensuous loudness of blast noise

by Koichi Sassa*, Masanao Okamoto* and Ichiro Ito*

By comparing sinusoidal noise with blast one with the aid of hearing sensibility of examinee, peak pressure level of continuous sinusoidal noise which is deemed to be equal loudness with blast one is decided for eight types of blast noises having peak pressure levels of 110 dB(C) and 90 dB(C) respectively. And then, the blast noises are measured by changing the meter dynamic characteristics of a precision sound level meter.

As the result, it is concluded that the value of noise level which is obtained by the meter dynamic characteristics of "Impulse" is a good measure of the sensuous loudness of blast noise.

(*Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606, Japan.)