

発破振動の性状について

内山成和・大山卓夫・金子忠夫

Characteristics of Vibration by Blasting

Shigekazu UCHIYAMA

Takuo OHYAMA

Fumio KANEKO

Abstract

In recent years the problem of the effects of vibration generated by foundation blasting on nearby structures and on people has received a lot of attention. For this reason, we gathered and arranged data from 11 different recent surveys that all used the same measuring system. Applying a consistent system of classification to each of the survey records, we investigated the effects of blasting vibration. For example, we distinguished waves showing maximum amplitude and examined frequency characteristics, amplitude size and distance and relation to explosive volume, etc..

The results of our investigations were as follows:

- (1) Waves which show maximum amplitude at the first stage may be considered to be P-waves.
- (2) Depending on the blast, the vibration frequencies produced fall for the most part within the 30 to 100 HZ range.
- (3) Acceleration amplitude and velocity amplitude are, generally speaking, inversely proportional to the square of the distance and are directly proportional to explosive volume.
- (4) Constant relating to the distance of the acceleration level and the vibration level is about -30 , and constant relating to the explosive volume is about 10.
- (5) There is a clear correlation between acceleration level and acceleration amplitude and between vibration level and velocity amplitude. However, there are some differences in the process of deducing these relationships.
- (6) The difference between the calculated and observed value for vibration scale using the formula for the relationship between scale of vibration (acceleration amplitude, velocity amplitude, acceleration level, vibration level) and distance, and explosive volume is generally in the range of ± 10 dB.

1 まえがき

発破振動の性状，例えば振動の大きさと距離，装薬量または地質，地盤状況，発破種別との関連については，国内外でこれまで多くの研究報告がなされている。これらの研究報告における測定方法は，種々色々あり，また測定量の表示も，変位全振幅の場合，振動速度の場合と

種々ある。

我々は，これまで多くの発破振動の測定を行ってきたが，これらの測定結果の中からほぼ同一の測定方法で得られた最近の11件，およそ800の原データを用いて同一の方法で記録を整理し，発破振動の性状についてのとりまとめと検討考察を行なった。

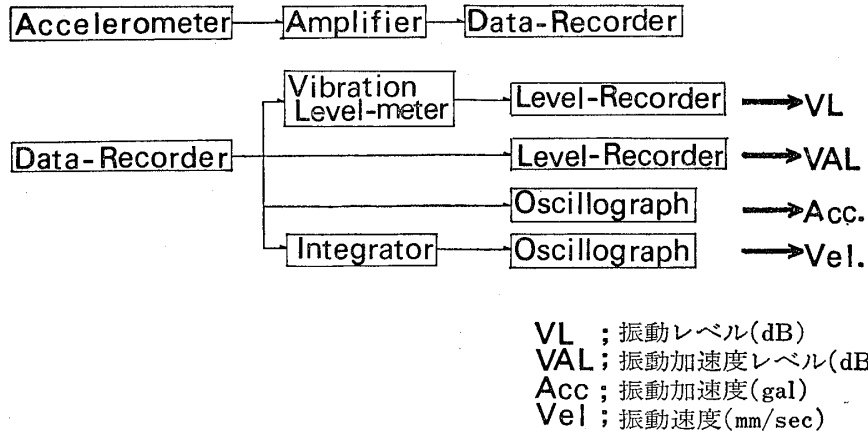


Fig. 1 Block diagram of measurement system

表一 発破振動測定条件一覧表

Table-1 Measuring Condition of ground vibration by blasting

地点 No.	振動測定		発破仕様						地質状況 Vp: 弾性波速度 (km/sec)
	総測点数	測定地点状況	発破種別 (ボーリング深度)	発破形式		装薬量(g) (初段装薬量)	装薬種別		
				段発	斉発			ダイナ マイト	他
A	4	山地斜面	試験発破 (GL-10m)		○	50~100	○		花崗岩
B	同上	同上	同上 (GL-3m)		○	200~2000	○		風化花崗岩 Vp=0.6~1.0
C	8	平担地	同上 (GL-12m)		○	30~300	○		花崗岩 Vp=2.0~2.5
D	4	同上	同上 (GL-14m)		○	50~400	○		砂岩
E	同上	同上	同上 (GL-10m)		○	33~200	○		GL-3m以深頁岩 ~砂岩 Vp=3.0
F	20	同上	同上 (GL-4m~-20m)	○	○	50~400 2000(200)	○		凝灰岩
G	4	同上 (隧道内2点 "外2点)	同上 (隧道内)		○	20~400	○		凝灰岩, 凝灰質泥岩 Vp=2.1~2.2
H	同上	山地斜面	隧道(横孔)掘削発破 土被り20m	○		3000~6700 (750~1200)	○		花崗岩 D~CL級岩盤
I	12	同上	隧道掘削	○		2290~25700 (400~600)	○		花崗岩
J	24	平担地	埋設工事, トレンチカット (GL-3m~-4.5m)	○		2150~9600 (1200~3600)	○		GL-3m以深礫岩
K	5	同上	斜面掘削, ベンチカット	○		(900~3000)	○	○ AN・ FO	粘板岩(強風化)

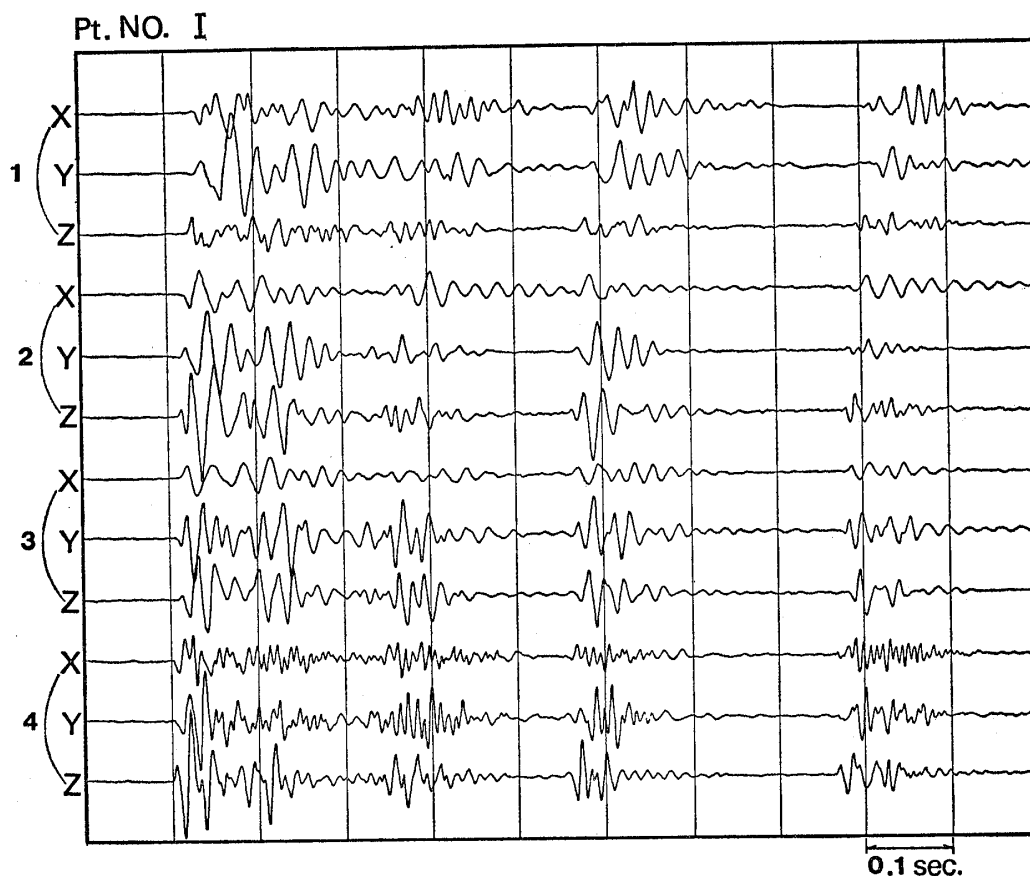


Fig. 2 A sample of wave form

2 測定および記録整理方法, 発破仕様

図一1に測定および記録再生時のブロックダイアグラムを示す。現地での測定時には、振動数 2~90Hz の範囲では出力が振動加速度に比例し、平坦な周波数特性を有する圧電型の振動ピックアップを用い、データレコーダーにより振動加速度記録の磁気テープ記録を得ている。

この振動加速度記録を再生時に処理をして、振動加速度、振動速度の波形写真記録と振動加速度レベル、振動レベルのレベルペン書き記録の計4種の記録を得た。

記録を再生、振動加速度レベル、および振動レベル記録を得る場合の高速レベルレコーダーのペン動特性は、振動加速度記録の場合が“Fast”，振動レベルの場合は“Vib Level”である。

なお、いずれの測定とも測定点は発破点より距離 4~5 m より 200m 以内の範囲にあり、また地盤の3成分の振動を測定しているが、その表示は以後振動伝播方向の水平動を X成分、それに対して直角方向の水平動を Y成分、上下動を Z成分とする。

このようにして得られた各記録について、振動加速度

Pt. NO. E Z - COMP.

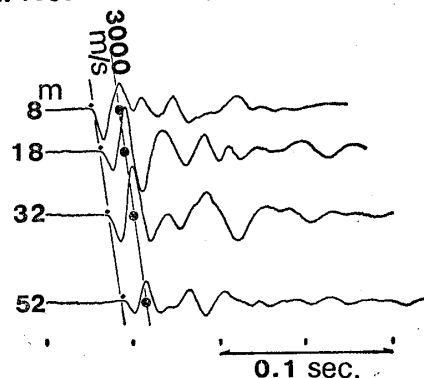


Fig. 3 Propagation of wave form

および振動速度の波形記録の場合は、最も大きな振幅を示す波の振幅(片振幅)を読み取りその振動加速度 (gal) および振動速度(mm/sec)を、またレベル記録の場合は、記録よりピークレベル値を読み取り、振動加速度レベル (dB)および振動レベル(dB)を求めている。

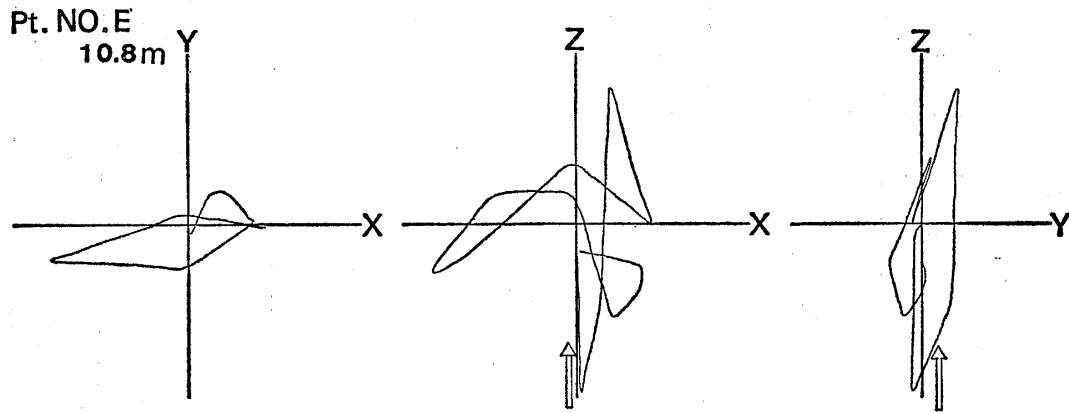


Fig. 4 Locus of velocity amplitude

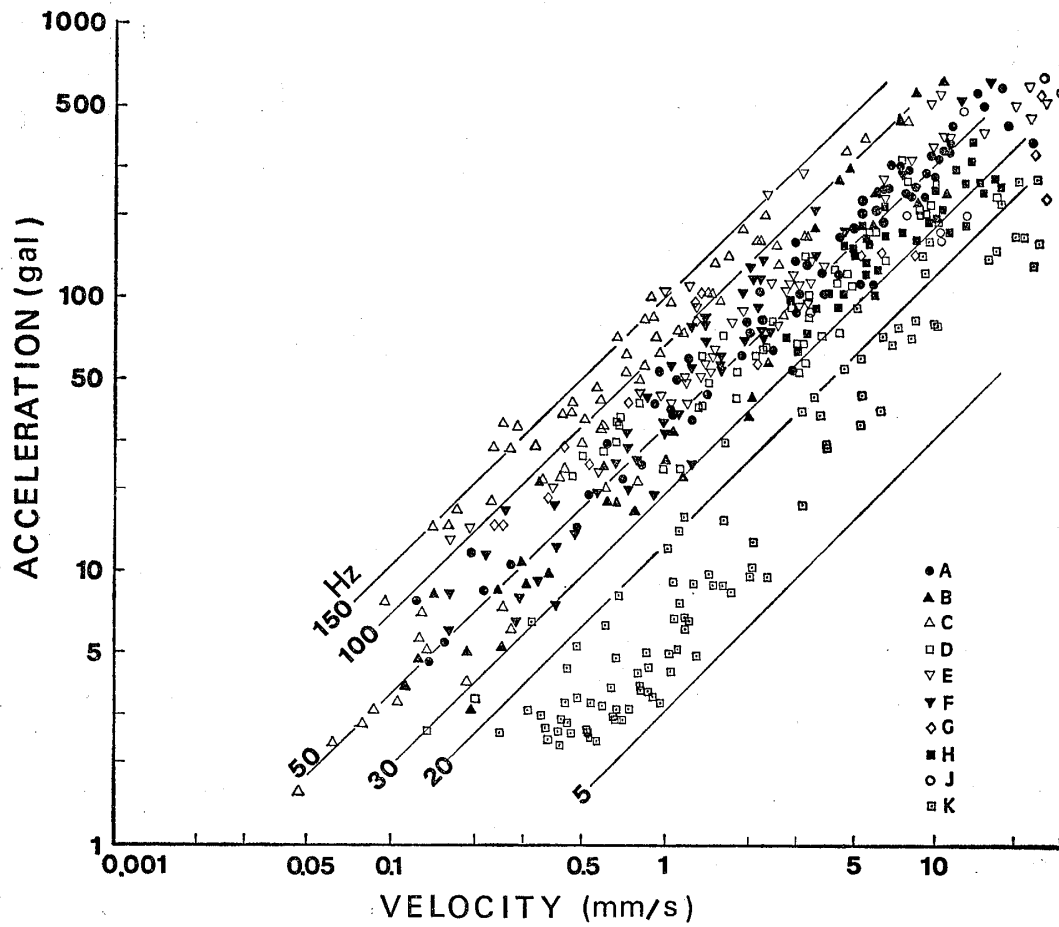


Fig. 5 Relation between velocity and acceleration

なお、段発発破の波形記録では、各段毎に波群は分れるが、最大振幅の読み取りは初段波群を対象として行なった。これは、段発発破の場合、初段と後段の装薬量比にもよるが、一般的に初段による振幅が最も大きいためである。

検討考察に当たっては、このようにして得られた各点各成分の各値とともに、振動加速度、振動速度については3成分の最大振幅を示した瞬間が一致したとした場合のベクトル合成振幅、振動加速度レベル、振動レベルについてはパワー合成値をも用いている。

次に発破の仕様について記せば、発破種別はボーリング孔を用いた試験発破、隧道掘削発破、トレンチカット

発破およびベンチカット発破の4種であり、各々件数は6件、2件、1件、1件の計11件となる。また、使用爆薬は、1件がダイナマイトとアンホの混合爆薬、他はすべてダイナマイト、装薬量は1段当たり数gより数kgの範囲である。

表一に振動測定および発破仕様他の一覧表、図一2に既述方法により得られた記録の1例を示す。なお、図一2の記録波形は、I地点の12段段発発破の振動速度記録の前半の一部分を示したものである。

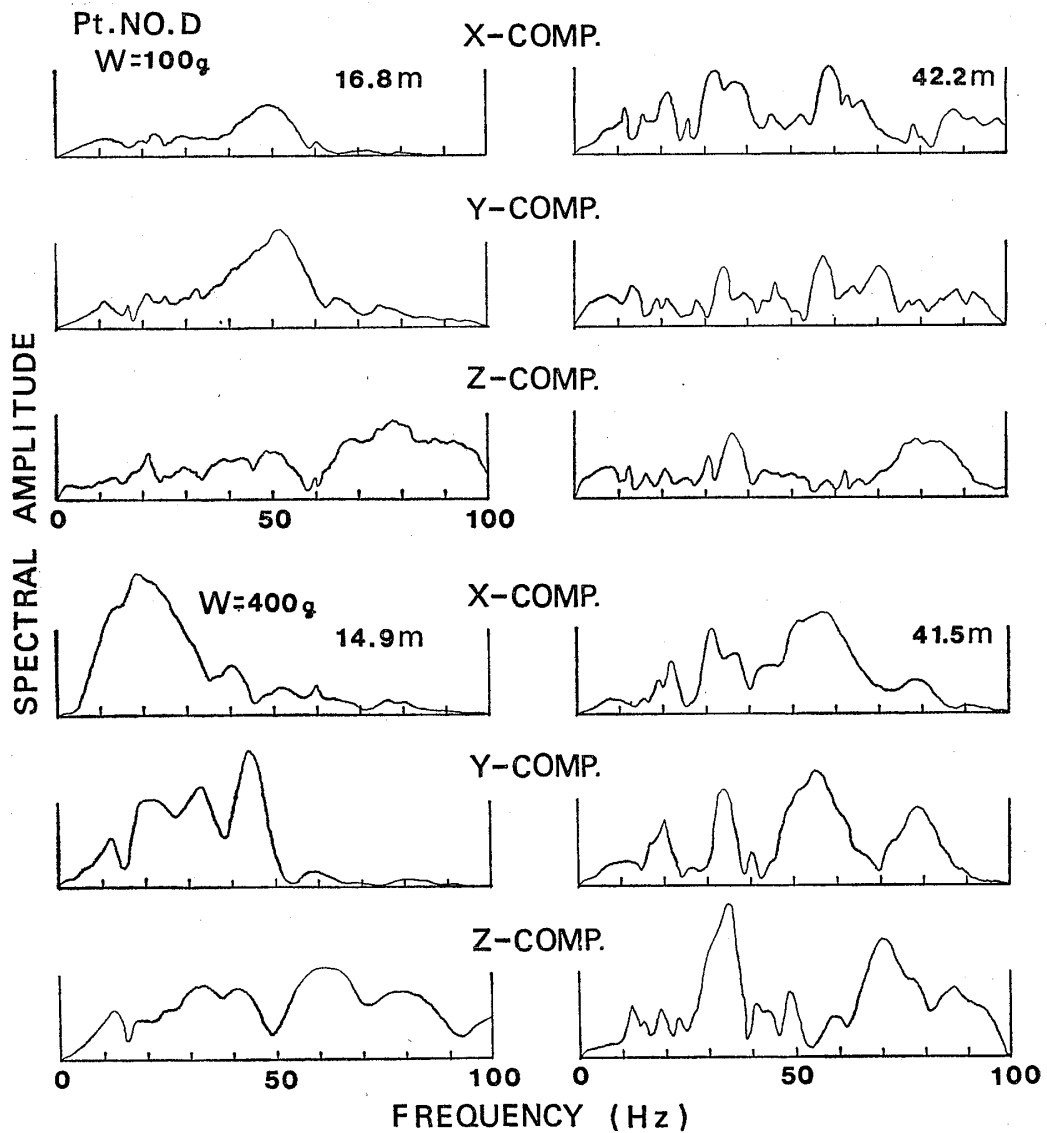


Fig. 6 Fourier spectra (1)

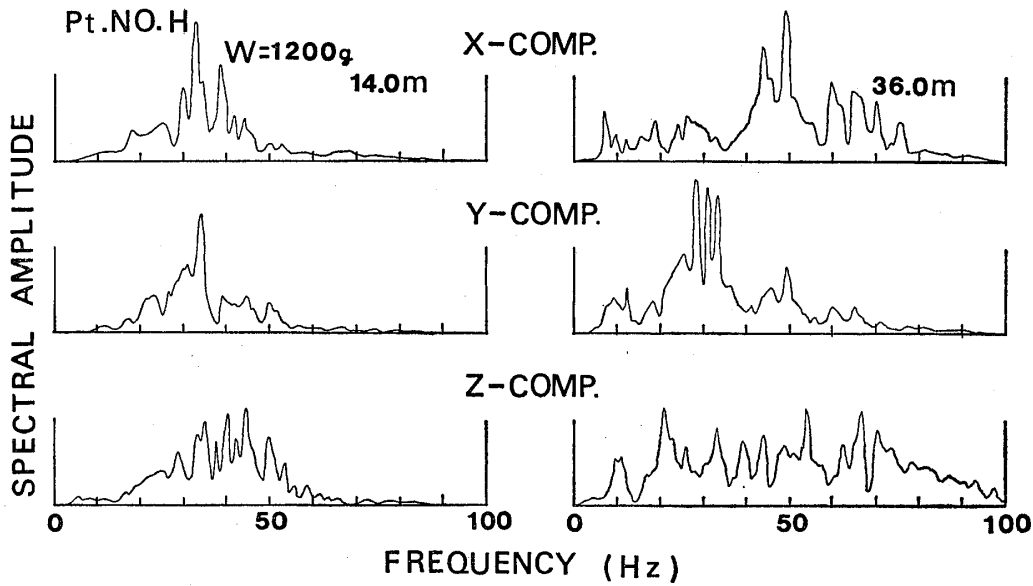


Fig. 7 Fourier spectra (2)

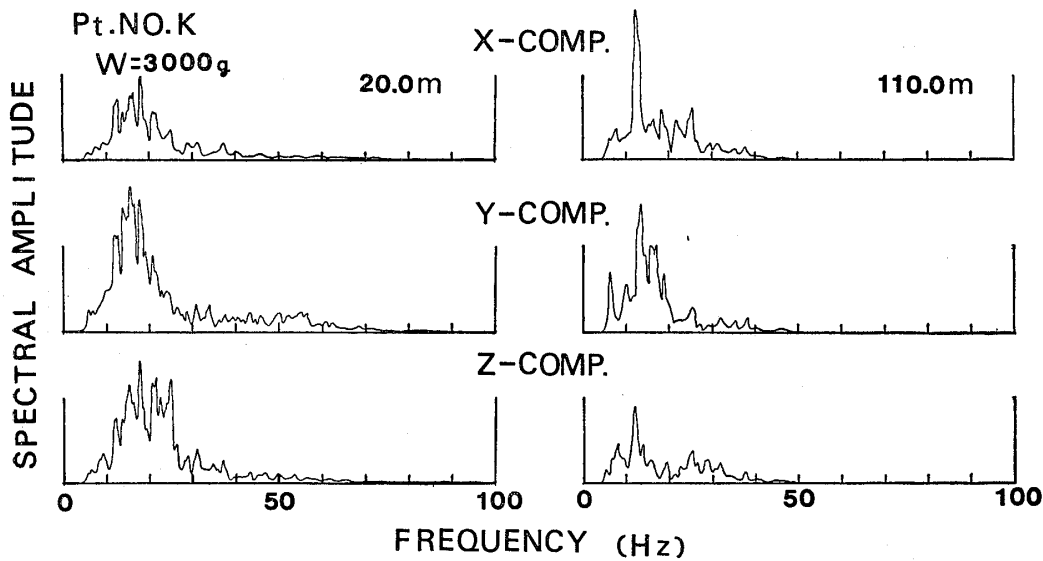


Fig. 8 Fourier spectra (3)

3 発破振動の振動加速度，振動速度記録に関する検討

3-1 波の種類

初めに，発破振動により発生伝播する振動，特に最大振幅を示す波の種類について調べてみる。

図一3に振動波形の伝播状況図を示した。これは，No. E地点のZ成分の振動速度記録である。図一3より初動（P波）および最大振幅を示す位相の伝播速度を求めると，両者とも3,000m/secの速度を示し，またこの

速度は当地で実施した弾性波探査結果が得られた地山のP波速度に一致する。この傾向は他地点での記録についてもみられる。

また，図一4に参考までに同地点での距離10.8m地点における振動速度の軌跡を示したが，X成分およびZ成分の振動が大きく，Y成分の振動は小さい。

一般に，列車，自動車走行によって発生伝播する振動は，表面波として捉えられているのに対し，今回のような発破条件，測定条件で得られる発破振動の最大振幅を示す波，すなわち初段（斉発の場合も便宜上，初段と表

示) 波群中の最大振幅を示す波の種別は、P波と見なし
て差し支えないと言える。

3-2 周波数特性

発破振動により発生伝播する振動の周波数特性を調べるため、各測点各成分のデータを用いて振動速度と振動加速度の関係図を作成、図-5に示した。この振動加速度、振動速度は、磁気テープに収録した各々の加速度記録を電磁オシログラフにより再生した加速度波形記録、加速度記録を再生、積分器により速度記録に変換後電磁オシログラフで記録した速度波形記録から読み取り求めたものである。図-6中の実線は、振動速度

(Vel : mm/sec) と振動加速度 (Acc : gal) の関係式

$$Acc = 2\pi \cdot f \cdot Vel / 10 \quad (1)$$

を用い、周波数 (f : Hz) をパラメーターとして引いたものである。なお、I地点は磁気テープに振動速度記録を収録したため図にはプロットしていない。

この結果によれば、発破振動による振動数は、大部分のものはおよそ30Hzより100Hzの範囲に入ると言えよう。

しかし、CおよびKの2地点は、100Hz以上150Hz程度まで、もしくは5Hz以上20Hz程度までの範囲内にあり、他ときわだてて異なった傾向を示している。一般に

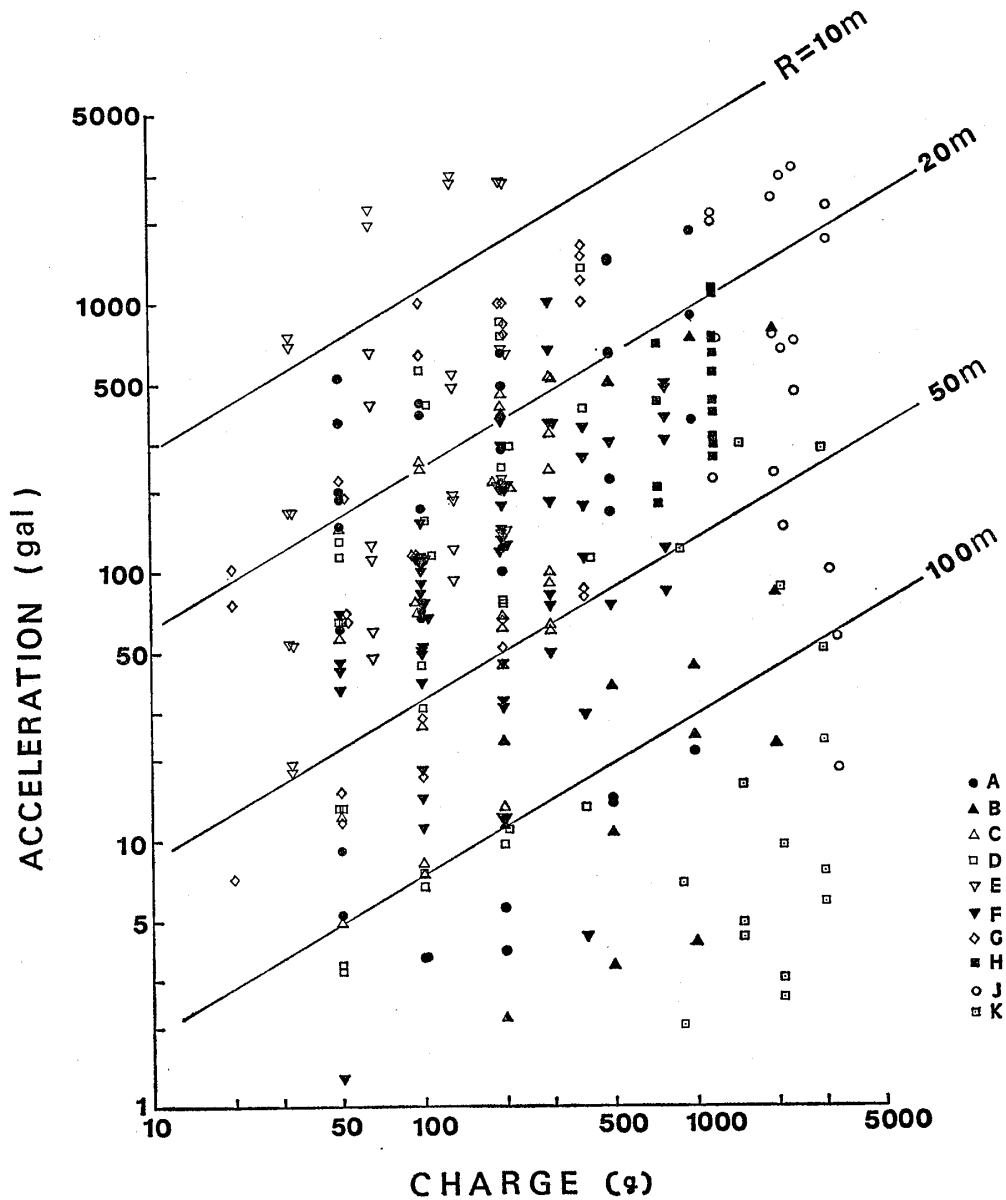


Fig. 9 Relation between explosive volume and acceleration amplitude

堅硬な岩盤ほど振動数は高く、軟かい岩盤ほど振動数は低くなる。

K地点は、表-1中に記したように強風化状態の粘板岩で機械掘削も可能に近いほど軟かいものであり、既述結果はこの地質状況また地盤状況を反映したものと推定される。C地点に関して言えば、他ときわだって振動数が異なる地質状況、地盤状況とは思われず、この場合は単にそれらの状況のみならず、発破方法等をも反映したものである。

同じく発破振動の周波数特性についてみるため、図-6にD地点の装薬量100gおよび400gの場合の距離約15m前後と42m前後の地点のフーリエスペクトルを算出し示した。このフーリエスペクトルは、振動速度記録のス

ペクトルである。

フーリエスペクトルから明らかなように、スペクトルのピークは、装薬量が多くなった場合、低い振動数の方へ移行する。また、一般的な概念とは異なるが、発破点からの距離が大きくなった場合、スペクトルのピークは高い振動数へ移行する傾向を示す。図-7にD地点より装薬量の大きなH地点のスペクトルを示したが、このスペクトルにも後者の傾向が表われている。

なお、図-8に既述のように他と異なった周波数特性を示したK地点のフーリエスペクトルを示す。図-6、図-7のスペクトルのピークは、およそ20~90Hzの範囲にあるのに対し、このK地点のスペクトルは、距離によっても変化なく、5~30Hzの間にピークを有し、先

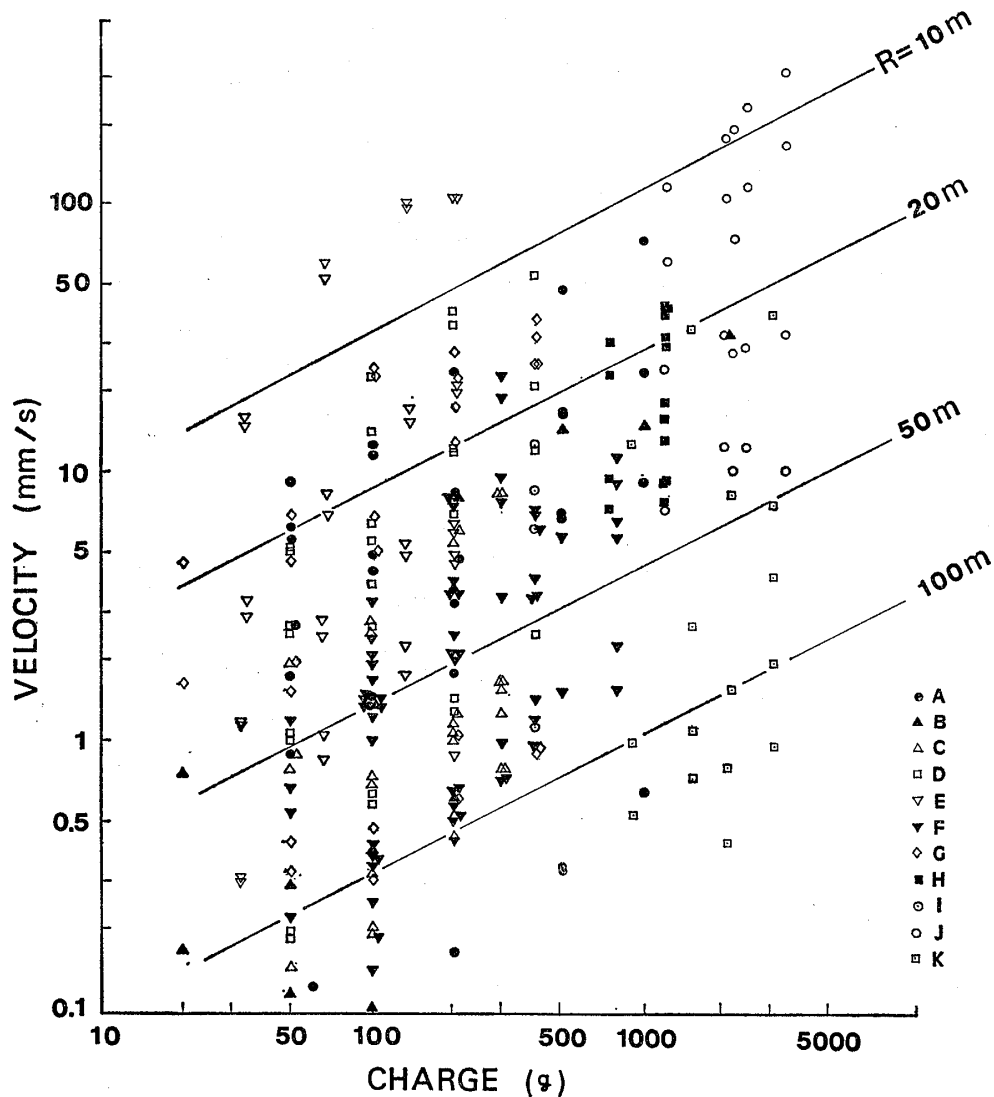


Fig. 10 Relation between explosive volume and velocity amplitude

の結果を裏付けている。

以上の結果をとりまとめると、発破振動による振動数は、20Hzより100Hzの範囲に大部分のものは入ると言えるが、しかし場合によってはCおよびK地点のように地質他状況を反映したと思われる特異な周波数特性を示すものが存在することを留意すべきである。

3-3 距離、装薬量と振動加速度、振動速度の関係

発破による振動の大きさと距離および装薬量との関係は、

$$A = A_0 \cdot R^m \cdot W^n \quad (2)$$

ただし、

A : 振動の大きさ (gal, cm/sec, mm/sec, etc.)

R : 発破点からの距離 (m)

W : 装薬量 (g, kg)

A₀ : 発破点等の岩質、地盤状況、発破種別、薬種等により定まる定数

m, n : 距離、装薬量に係わる指数

なる関係式で表わされることが良く知られており、これまでの多くの研究報告によれば、mは-2前後、nは1/2より1位の値をとる。

今回の一連のデータを用いて、距離、装薬量と振動加速度、振動速度の関係をみるために作成した図を、図-9より図-12に示す。

図-9および図-10は、装薬量と振動加速度、振動速度、図-11および図-12は距離と振動加速度、振動速度の関係図である。なお、図-9および図-10は種々の距

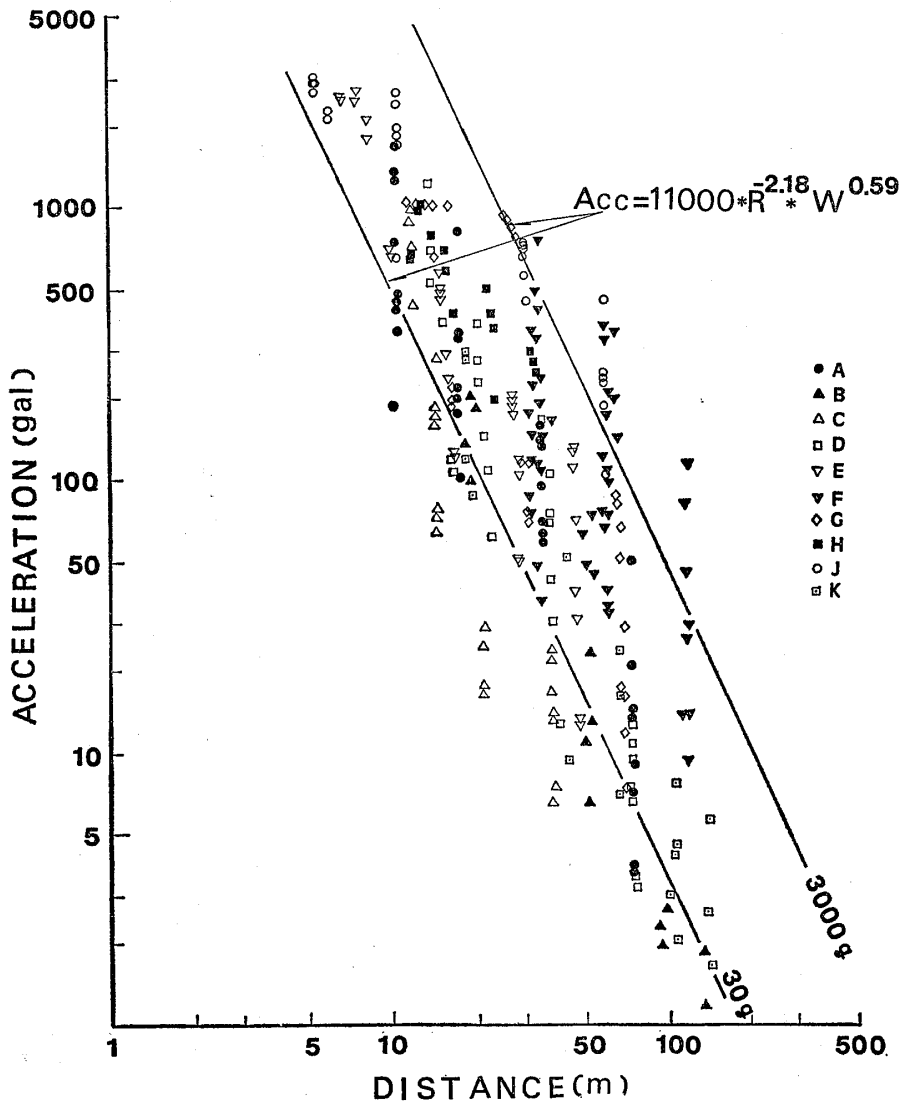


Fig. 11 Relation between distance and acceleration amplitude

離、図-11および図-12は種々の装薬量のデータを一括してプロットしている。また、振動加速度、振動速度は既述した3成分の合成振幅である。

図-9および図-10を見ると明らかなように、装薬量が多くなった場合、大局的に振動加速度、振動速度とも

増大し、かつ図-11および図-12から明らかなように距離が増すに従って減少する。ただし、図-9中のK地点のデータは、装薬量が他に比べかなり大きいにもかかわらず、振動加速度は非常に小さい。しかし、図-10の振動速度記録では、それほど顕著ではない。このことは、

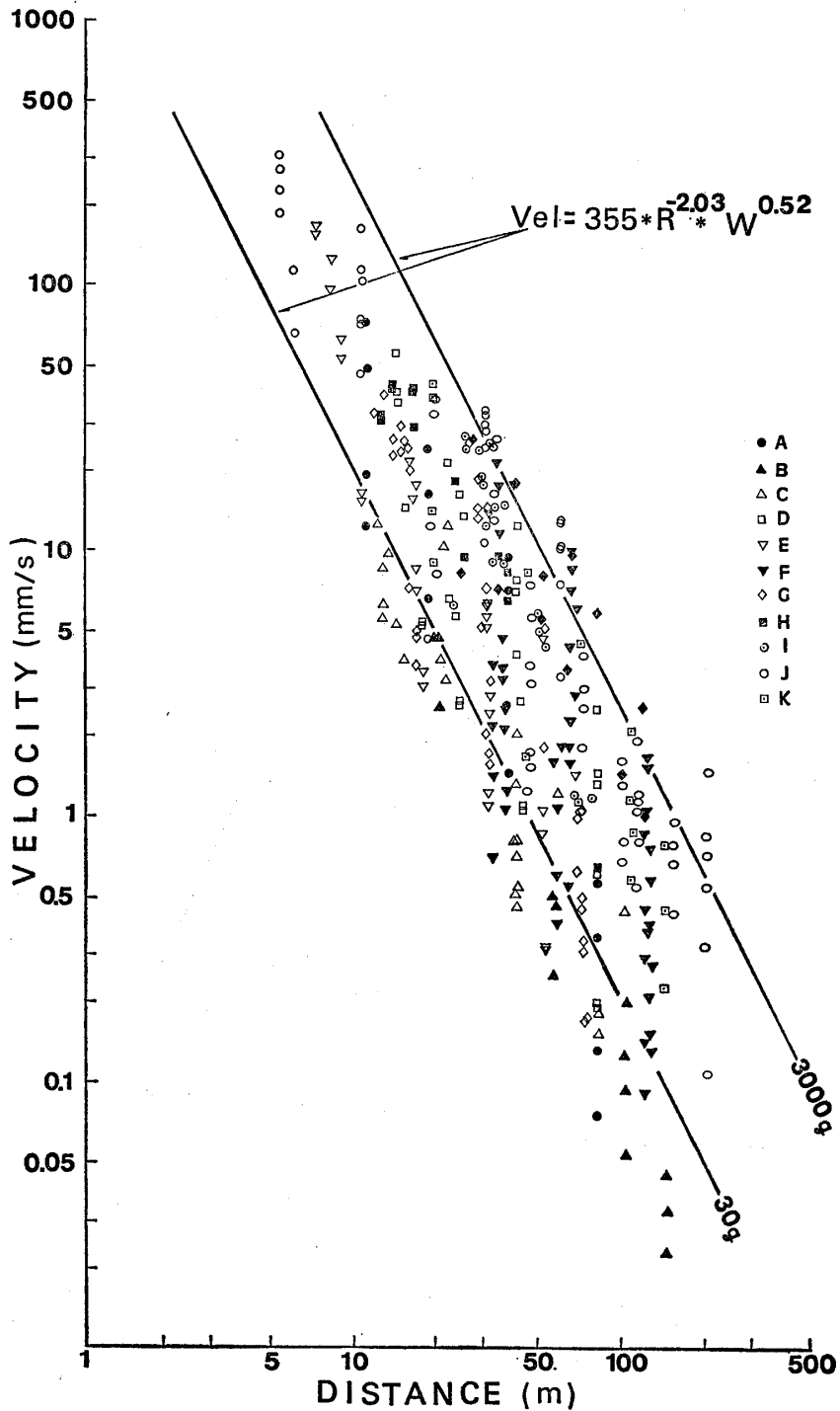


Fig. 12 Relation between distance and velocity amplitude

先の周波数特性が他と異なっていることと関連しているものと思われる。

そこで、振動加速度についてのみK地点と既述I地点のデータを除外、他全データを用い最小二乗法によって測定データの最良近似となるように(2)式の定数および指数を定めると、下記の式になる。

$$\text{振動加速度 } Acc = 11,000 \cdot R^{-2.18} \cdot W^{0.59} \quad (3)$$

$$\text{振動速度 } Vel = 355 \cdot R^{-2.03} \cdot W^{0.53} \quad (4)$$

ただし、acc : gal, vel : mm/sec, R : m, W : g

なお、K地点のデータをも含めて計算すれば、(3)式の定数、指数は、49,000、-2.77、0.35となり、距離に係わる指数が負に大きく、装薬量に係わる指数がかなり小さくなる。このことは既述のようにK地点は、かなり他と異なった傾向を有することを示す。

伊藤他によれば、指数 n は $2/3$ 、 m は -2 、また吉川他によると n は $3/4$ 、 m は -2 となっている。今回の(3)および(4)式は、 m は伊藤、吉川とほぼ同じであるのに対し、 n は若干小さ目の値となっている。定数に関して言えば、振動速度の場合は伊藤他によると25~100、吉川他によれば明り発破の場合でおよそ6程度となる。なお、伊藤他は単位を kine, m, g, 吉川他は kine, m, kg で

表示した場合の定数を示しているが、既述値はmm/sec, m, g に直した場合のものである。吉川他の定数は、明り発破のもので、今回の一連の発破と比較し得ないが、伊藤他による定数と較べると今回の(4)式の定数は、かなり大きな値となっている。

これは、今回の一連のデータの中に孔内での試験発破、いわゆる荷の重い発破による測定データが多いこと、また3成分の合成振幅を用いているためと考えられる。

なお、図-9より図-12中には、(3)および(4)式で表わされる距離、装薬量と振動加速度、振動速度の関係を、距離もしくは装薬量をパラメーターとして示しておいた。

4 発破振動の振動加速度レベル、振動レベル記録に関する検討

4-1 振動加速度と振動加速度レベル、振動速度と振動レベルの関係

最近の振動測定では、振動レベルまた振動加速度レベルでの測定も多く、また振動規制法では、規制基準値として振動レベルを用いている。

そこで今回の発破振動についても、振動状態を忠実に

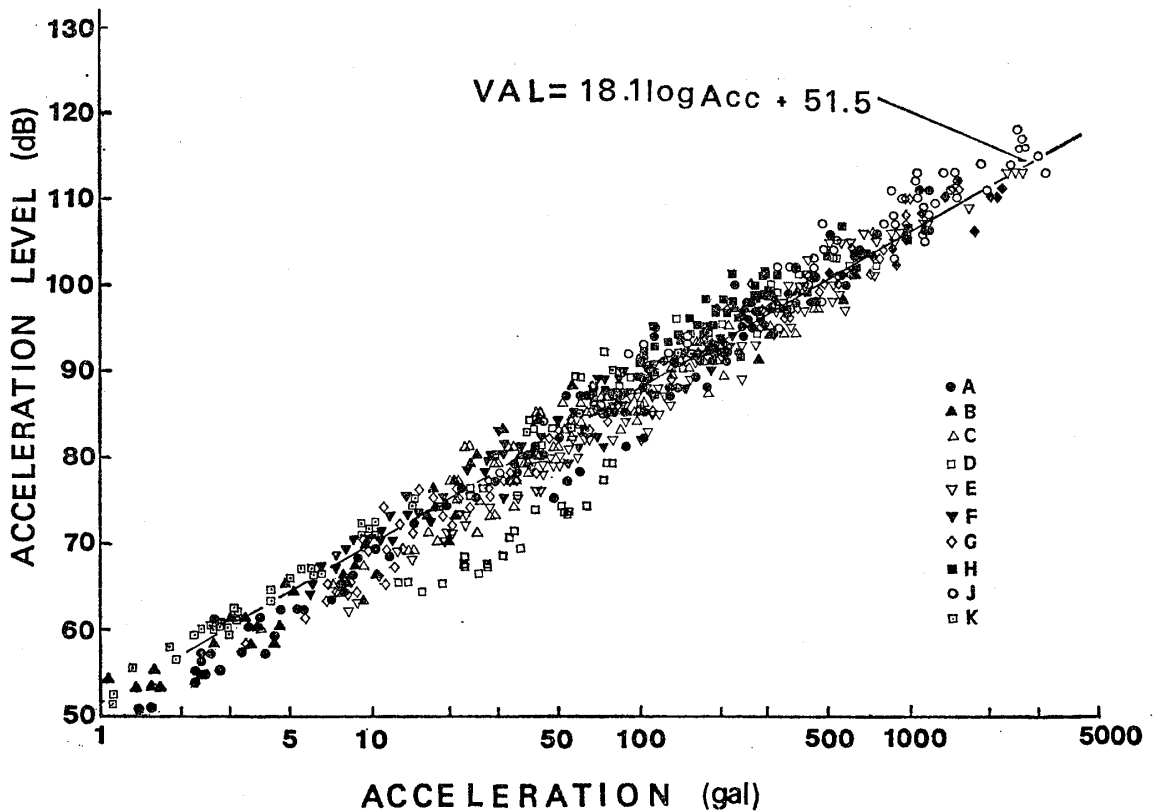


Fig. 13 Relation between acceleration amplitude and acceleration level

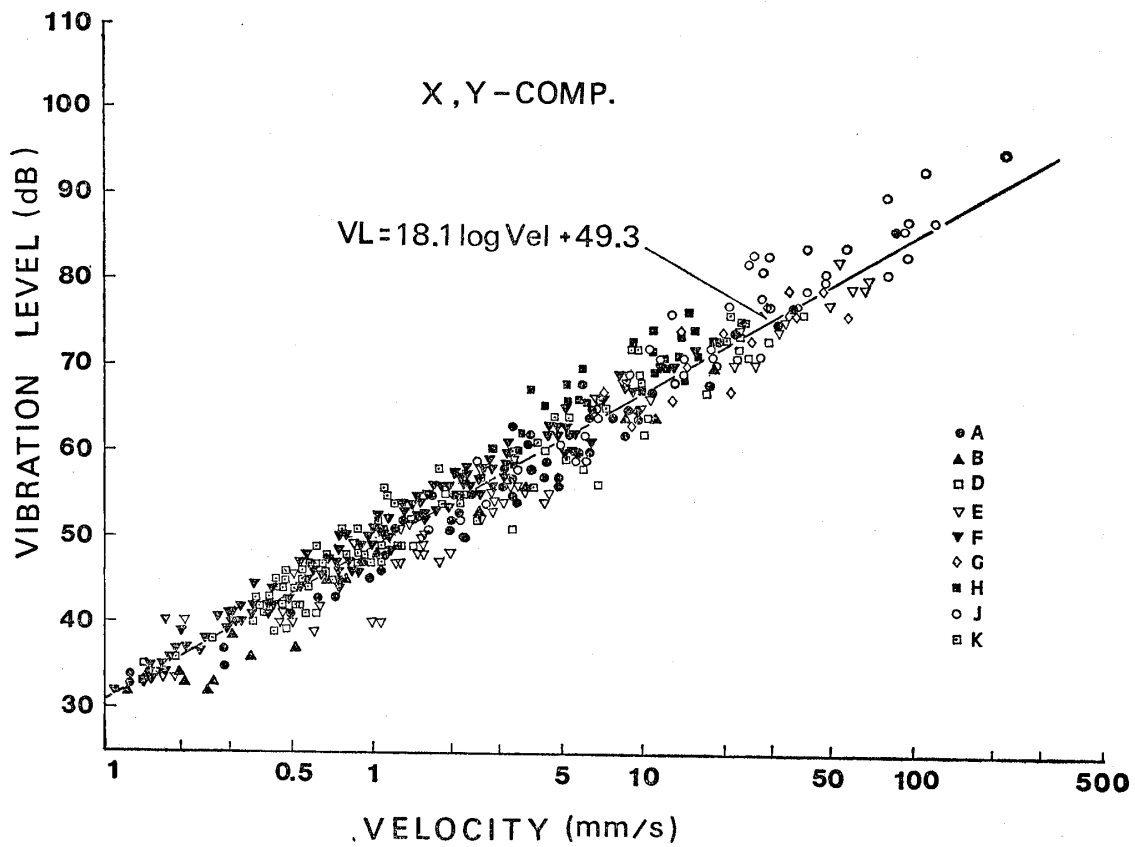


Fig. 14 Relation between velocity amplitude and vibration level

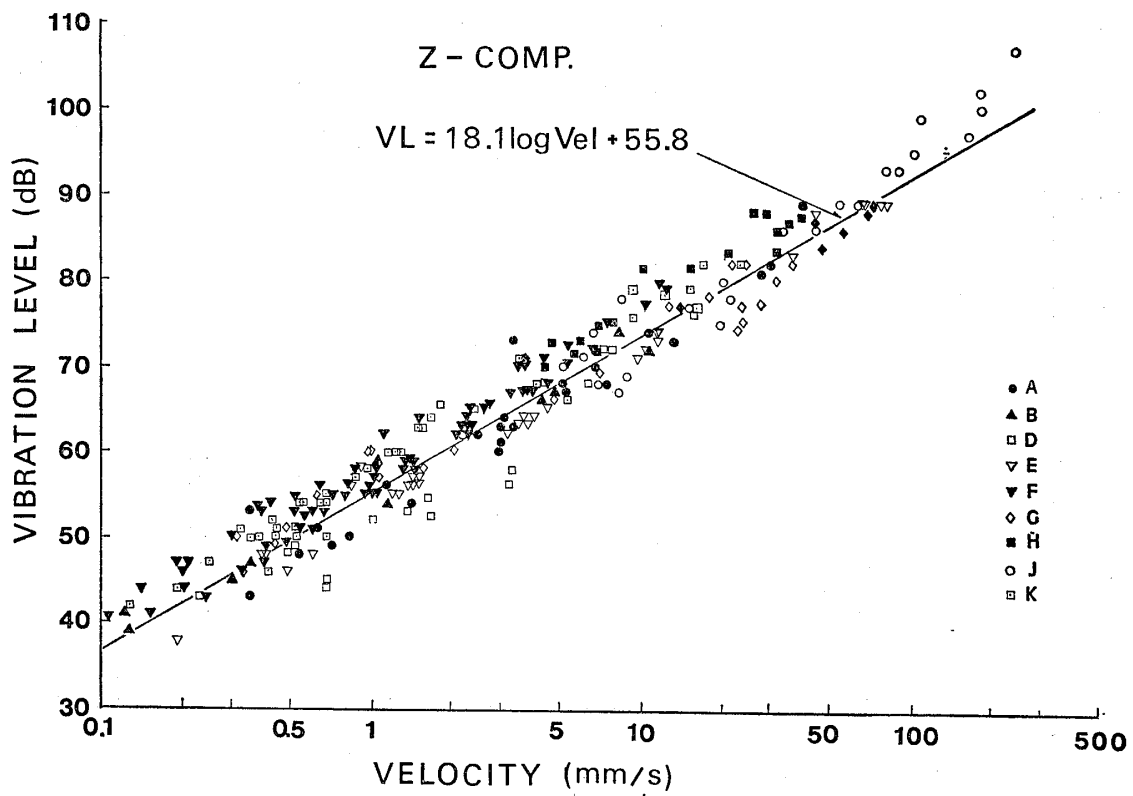


Fig. 15 Relation between velocity amplitude and vibration level

示している振動加速度、振動速度記録と高速度レベルレコーダーのペン書き記録より得られる振動加速度レベル、振動レベル記録の関係について調べてみる。

図-13は振動加速度と振動加速度レベル、図-14および図-15は振動速度と振動レベルの関係図であり、各点各成分のデータをプロットしている。図-14の振動加速度は、振動加速度波形写真記録より、振動加速度レベルは、加速度記録を再生高速度レベルレコーダーにより記録し求めたものである。また、図-14および図-15の振動速度記録は、3-2に記した同方法により、振動レベルは加速度記録を再生後、振動レベル補正回路を通し振動レベル記録に変換、高速度レベルレコーダーにより記録し求めたものである。振動レベルでの図が、X・Y成分とZ成分に分かれているのは、X・Y成分とZ成分で補正曲線が異なるためである。

なお、図-14および図-15では既述I地点の他C地点のデータは除外した。これは、振動レベル記録にした場合、暗振動と発破振動の周波数の兼ね合いからSN比が非常に悪くなり、発破振動の判別が困難であったことによる。

さて、振動加速度、振動速度と振動加速度レベル、振

動レベルの間には

$$A = A_0 \cdot \log a + B \quad (5)$$

で表わされる関係式が成立する。

そこで、最小二乗法によりこれらの各値を求め、下記の関係式が得られた。

$$VAL = 18.1 \cdot \log Acc + 51.5 \quad (6)$$

$$VL = 18.1 \cdot \log Vel + 49.3 \quad (X \cdot Y \text{成分}) \quad (7)$$

$$VL = 18.1 \cdot \log Vel + 55.8 \quad (Z \text{成分}) \quad (8)$$

ただし、

VAL: 振動加速度レベル (dB)

VL: 振動レベル (dB)

Acc: 振動加速度 (gal)

Vel: 振動速度 (mm/sec)

一方、理論的には、上記の関係は下式で表わされる。

$$VAL = 20 \cdot \log Acc + 54 \quad (9)$$

$$VL = 20 \cdot \log Vel + 62.5 \quad (X \cdot Y \text{成分}) \quad (10)$$

$$VL = 20 \cdot \log Vel + 71 \quad (Z \text{成分}) \quad (11)$$

この双方の式を比較すると、実測データより得られた勾配および切片を示す2つの定数とも、理論式のそれより小さく、特に切片を示す定数は(6)式では3、(7)式では13、(8)式では15程度、理論式のそれより小さい。言い替

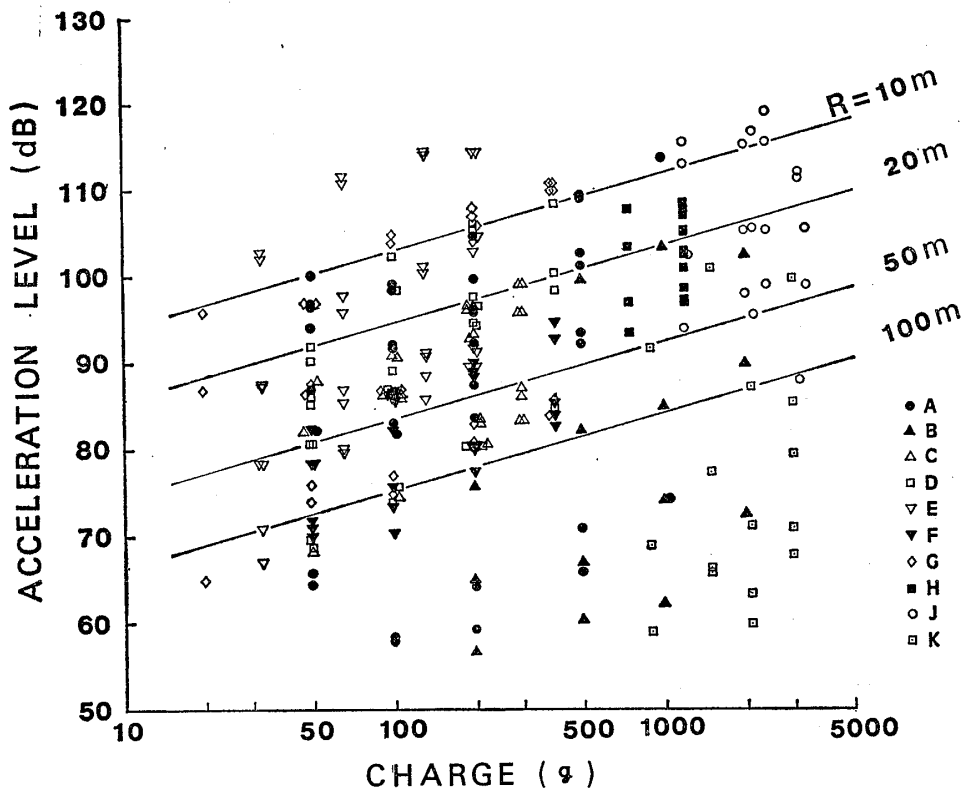


Fig. 16 Relation between explosive volume and acceleration level

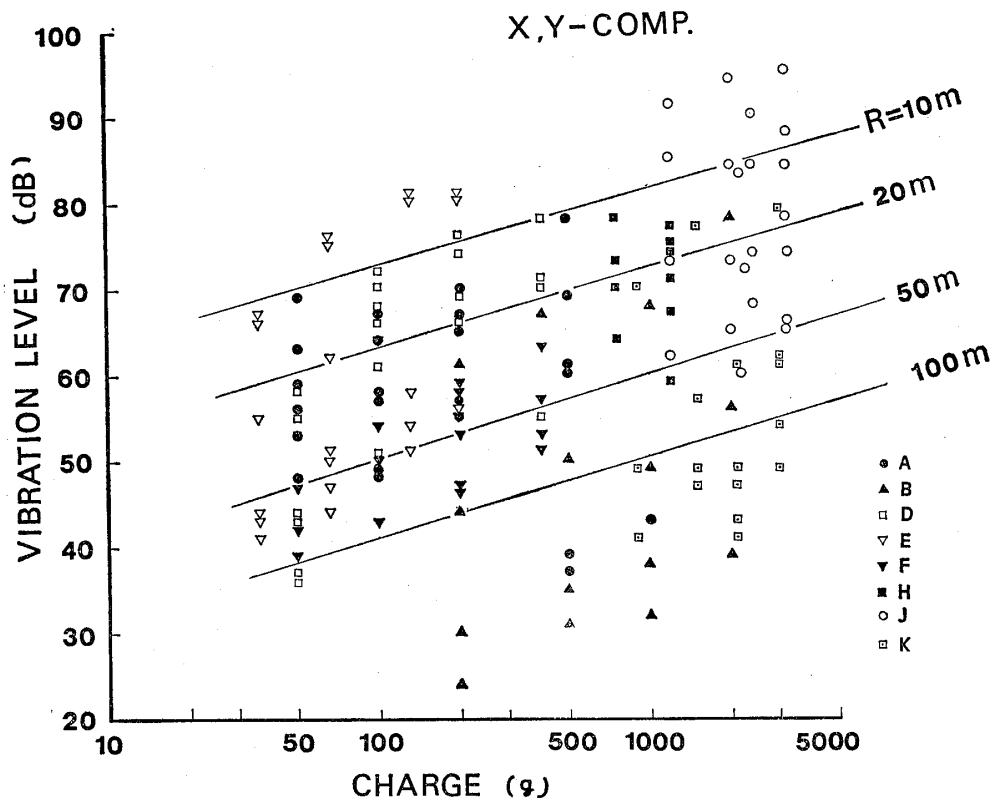


Fig. 17 Relation between explosive volume and vibration level

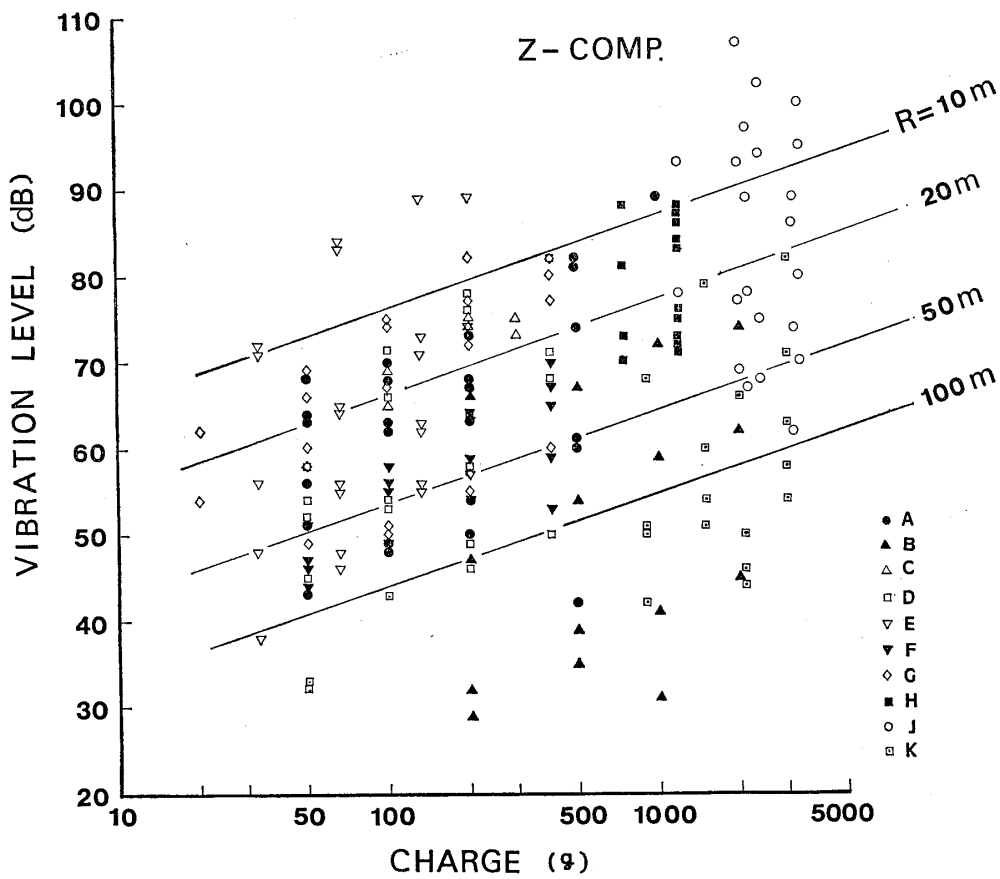


Fig. 18 Relation between explosive volume and vibraton level

えれば、高速度レベルレコーダーを用いて測定して得られる振動加速度レベル、振動レベルの値は、(9)式より(11)式から求められる真実の値より既述値程度差異を生じ、小さな値となることを示している。

なお、この差異の理由については、後に記す。

4-2 距離、装薬量と振動加速度レベル、振動レベルの関係

3-3と同様に、振動加速度レベル、振動レベルについても距離と装薬量の関係を調べてみる。

図-16より図-18には振動加速度レベル、振動レベルと装薬量、図-19より図-21には同じく距離との関係図を示した。

なお、振動加速度レベルは三成分のパワー合成値、振動レベル水平動はX・Y成分のパワー合成値、Z成分は測定値である。なお、これら図中には、先に記したと同様な理由により除外したデータがある。

図-16より図-18を見ると装薬量が大きくなる程、大局的に振動加速度レベル、振動レベルは大きくなり、かつ図-19より図-21から明らかなように距離が増すに従っ

て、それらは減少する。また、図-16のK地点のデータは、図-9と同様に装薬量が他にくらべ大きいにもかかわらず、振動加速度レベルは小さくなっている。

距離、装薬量と振動加速度レベル、振動レベルの関係は、(2)式を変形した形の

$$A' = A_0' + m' \cdot \log R + n' \cdot \log W \quad (12)$$

なる関係式で表わされる。

そこで、振動加速度レベルについては、既述状況のためK地点のデータを除外し、実測データの最良近似とするように(12)式の定数を定めると下記の式となる。

$$VAL = 113.2 - 27.8 \cdot \log R + 8.9 \cdot \log W \quad (13)$$

$$VL = 85.6 - 31.3 \cdot \log R + 9.1 \cdot \log W (X \cdot Y \text{成分}) \quad (14)$$

$$VL = 87 - 32.3 \cdot \log R + 10.8 \cdot \log W (Z \text{成分}) \quad (15)$$

4-3 振動加速度レベル、振動レベル記録の特性

前節に、距離、装薬量と振動加速度レベル、振動レベルの関係について求めてみたが、(2)式の定数、指数と(12)式の定数の間には、本来下記の関係が成立しなければならない。

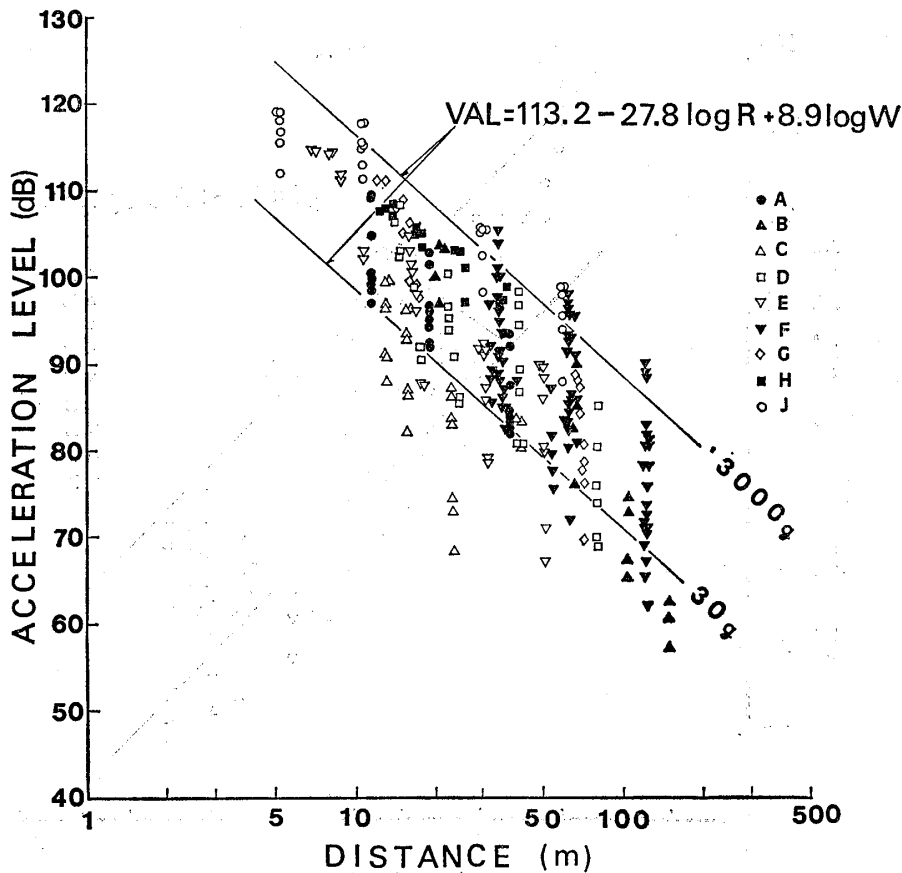


Fig. 19 Relation between distance and acceleration level

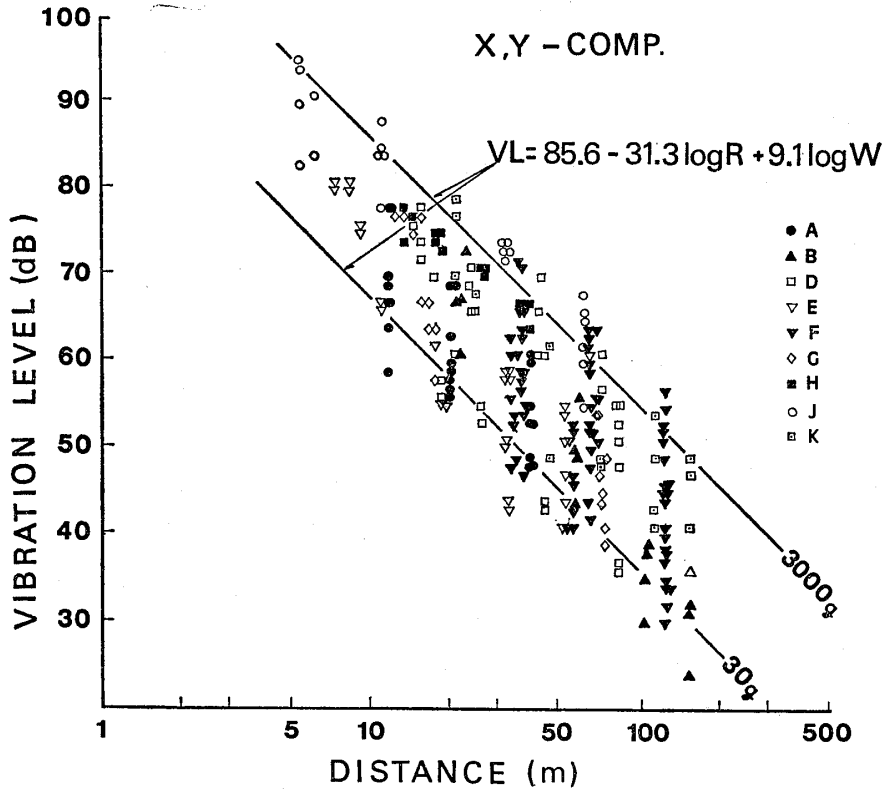


Fig. 20 Relation between distance and vibration level

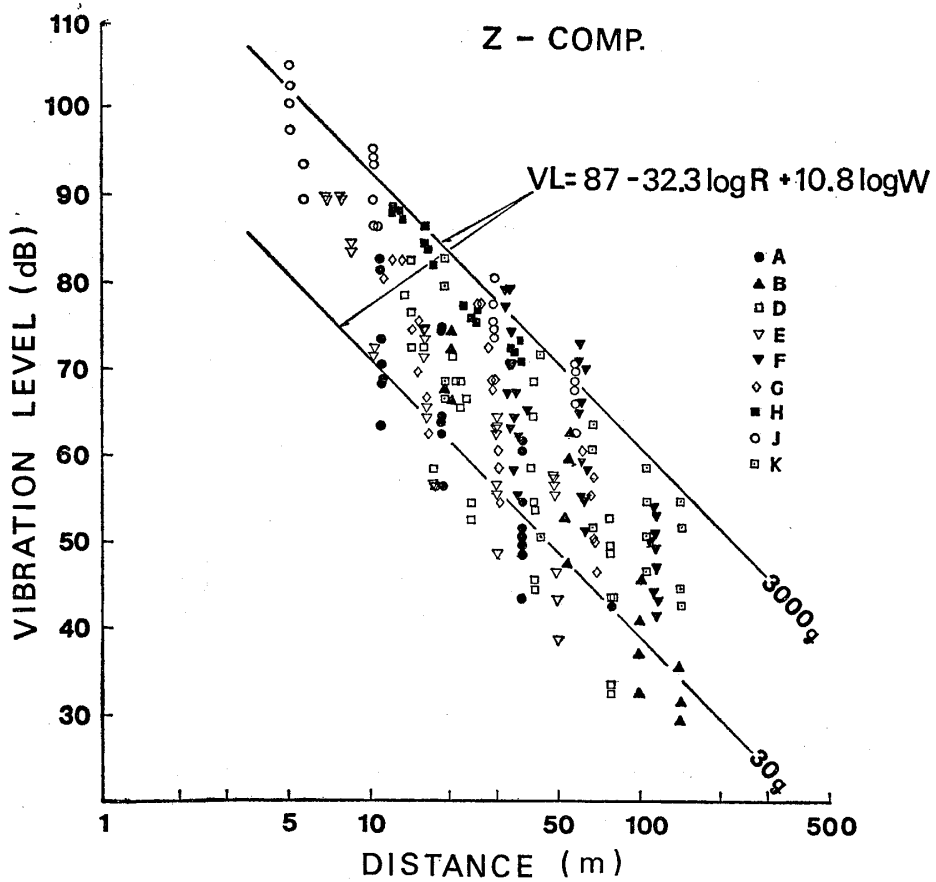


Fig. 21 Relation between distance and vibration level

$$A_0' = 20 \cdot \log A_0 + \begin{cases} 54 & (\text{振動加速度レベル}) \\ 62.5 & (\text{振動レベル, XY成分}) \\ 71 & (\text{振動レベル, Z成分}) \end{cases} \quad (16)$$

$$m' = 20 \cdot m \quad (17)$$

$$n' = 20 \cdot n \quad (18)$$

(3), (4)式に示した m, n の値より m', n' を算出すれば, m' は振動加速度レベルでは -43.6 となるべきところが -27.8 , 振動レベルでは -40.6 が -31.3 および -32.3 と一側で小さくなっている。 n' は加速度レベルが 11.8 に対し 8.9 , 振動レベルは 10.6 に対し 9.1 および 10.8 とほぼ同等な値を示す。

5 発破振動の予測

発破によって発生伝播する振動は, 同一薬量, 同一距離でも種々の条件によって変化するものであり, 厳密な予測は本質的に不可能である。しかしながら, ある程度の範囲でも予測し得るものならば, 発破掘削による振動の対策の必要性を判断する目安となる。

そのため, この発破による振動予測について, 若干の検討を行なってみる。

実測データを用いて求められた距離, 装薬量と振動加速度他との関係については, 式(3), (4), (13), (14)および(15)

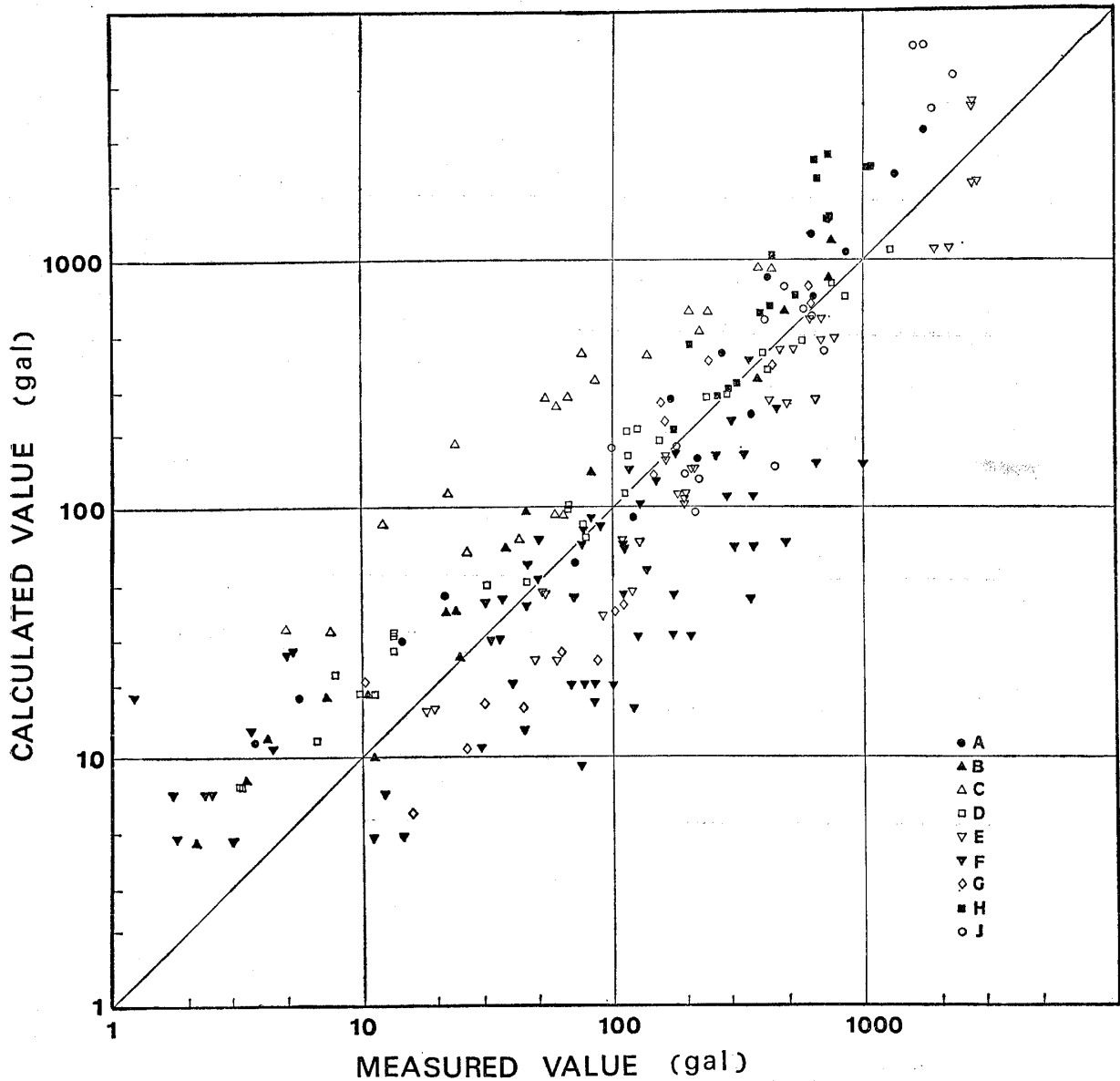


Fig. 22 Comparison between measured and calculated acceleration amplitude

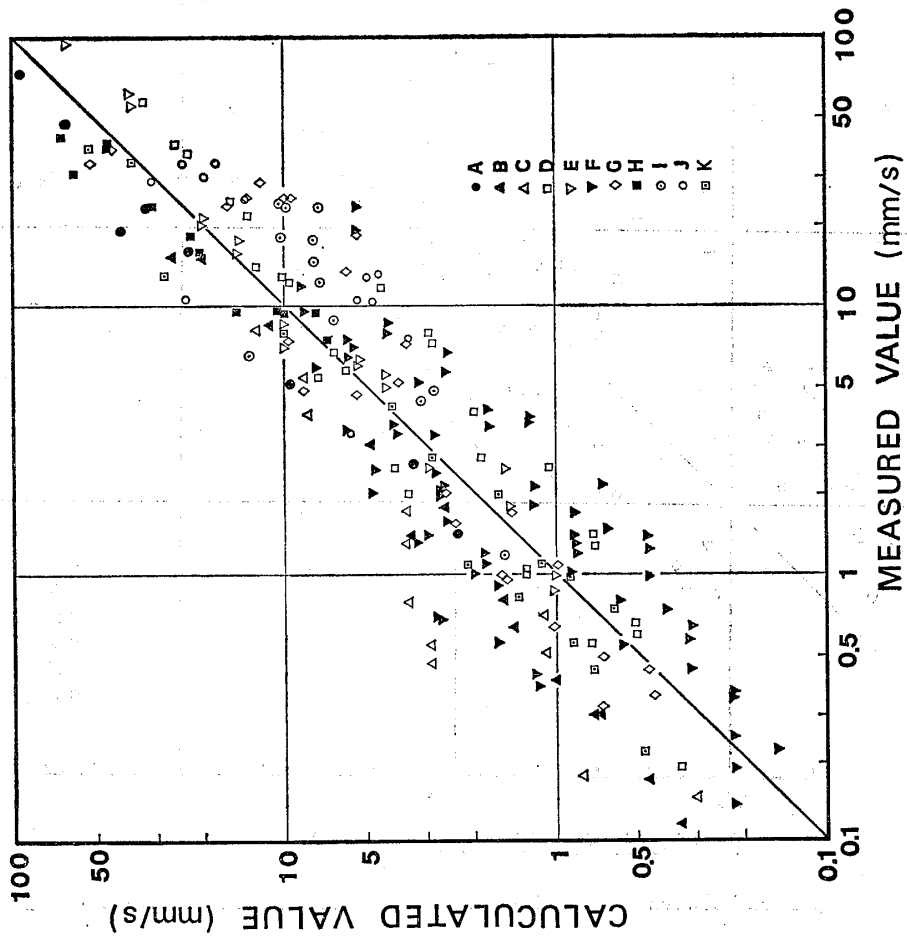


Fig. 23 Comparison between measured and calculated velocity amplitude

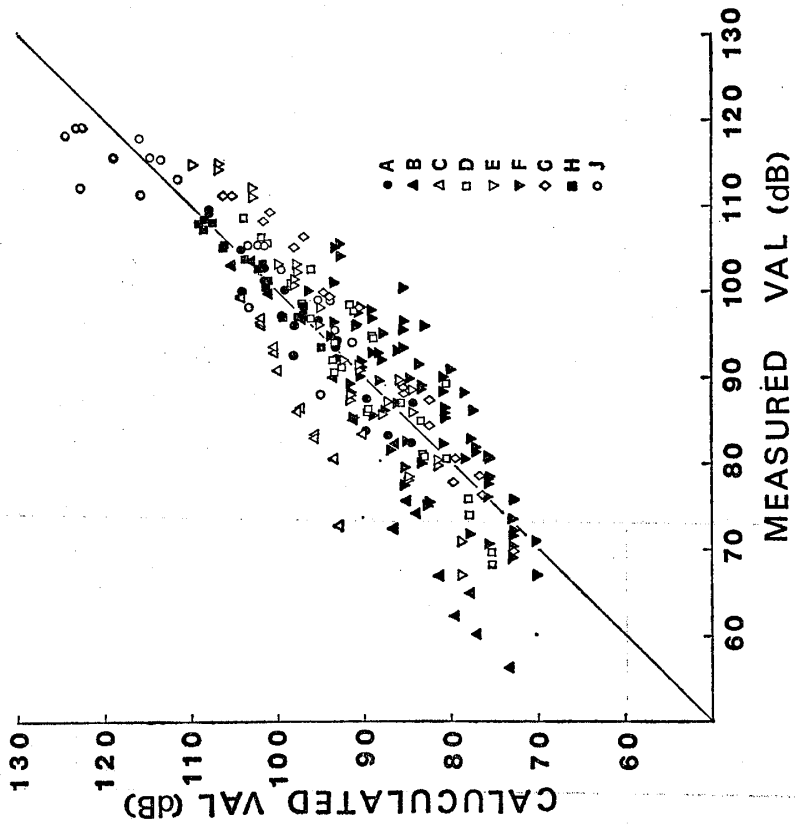


Fig. 24 Comparison between measured and calculated acceleration level

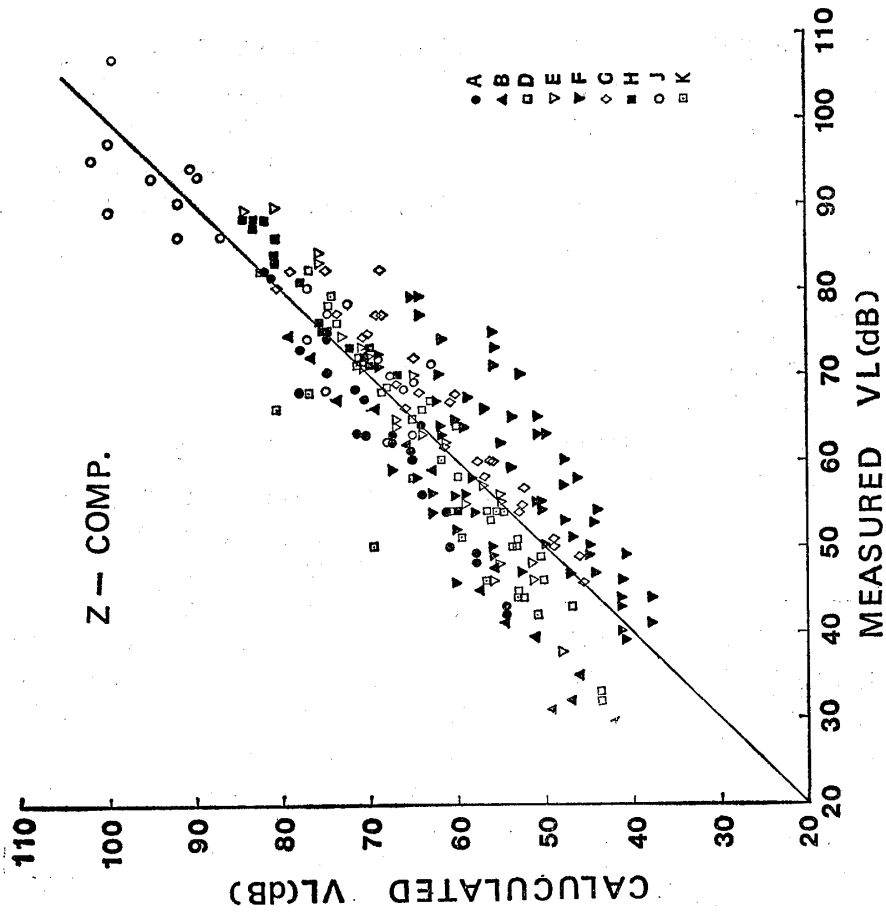


Fig. 26 Comparison between measured and calculated vibration level

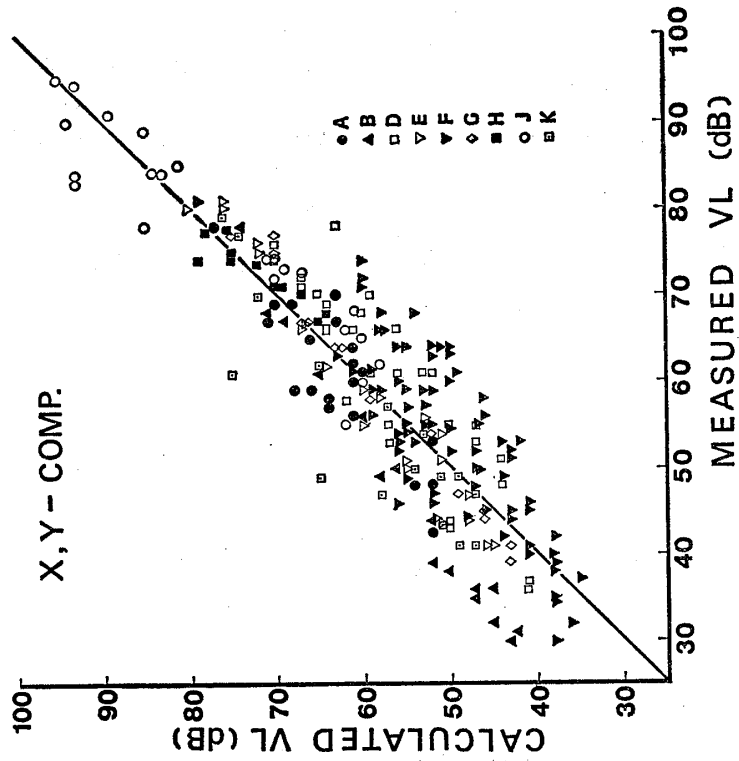


Fig. 25 Comparison between measured and calculated vibration level

で表わされるが、これら各式を用いて計算した計算値と実測値との比較図を、図-22より図-26に示す。なお、これらの図中には、前にも記した理由により除外したデータがある。

図-22, 図-23は振動加速度と振動速度, 図-24より図-26は振動加速度レベル, 振動レベルの比較図である。

しかしながら, A_0' は加速度レベルで134となるべきところが113.2, 振動レベルでは $X \cdot Y$ 成分で113が85.6, Z 成分で122が87とかなり小さな値となる。

このことは, 前節にも記したが, 高速度レベルレコーダーを用いて得られる振動加速度レベル, 振動レベル値は真実の値よりかなり小さなものとなることを示している。

これは, 高速度レベルレコーダーのペンの動特性から, 発破振動のような振動の立ち上がり, 立ち下がり時間の非常に速い衝撃的な短時間の振動に対しては, ペンが実際の記録に追随しないことによる。

レベル記録, 特に振動レベル記録は本来人体感覚に合致させたものであるため, 振動の人体感覚が問題となる場合はレベル記録からの値で議論をしても差し支えないが, その絶対値が問題となる場合, 特にそれが発破振動のような衝撃的振動であるならば, 真実の値と記録値の間に既述値程度のかかなり大きな差異の生ずることを含んでおかなければならない。

図-22および図-23をみると, 特にバラツキの大きいものも若干あるが, 大部分の実測値は計算値の1/3より3倍の範囲, すなわち $\pm 10\text{dB}$ 程度の範囲内に入っている。

また, 図-24から図-26の振動加速度レベル, 振動レベルについても, 大部分のものは計算値と実測値の差異が $\pm 10\text{dB}$ 以内にあると言える。

この結果から, 今回の近似式を用いて振動を予測しても, 今回と同様な発破条件, すなわち薬量数10gより数kgの比較的荷の重い発破, また同様な測定条件であるならば, およそ $\pm 10\text{dB}$ 程度の差異で予測し得るとも言えよう。

しかしながら, K 地点のように他とかなり異なった傾向を示す場合もあり, 厳密性が要求される場合には, 実際に試験発破を行ない, その振動性状を把握することがやはり必要であると言えよう。

6 あとがき

以上, 同一の測定方法, 整理方法から得られた記録を用いて発破振動の性状についてのとりまとめと検討考察

を行なった結果について記した。

なお, 波の種類, 周波数特性, また従来得られていなかった振動加速度レベル, 振動レベルと距離, 装薬量との関係などについて求めたが, 今後さらにデータの蓄積をはかり, また次の機会に報告したいと考える。

参 考 文 献

- (1) 畑中元弘(1962): 発破による地盤および建物の振動—実験公式の提案—建設工学研究所報告 No.3
- (2) 畑中元弘(1964): 発破による地盤および建物の振動(第2報)建設工学研究所報告 No.6
- (3) W. I. Duvall & D. E. Fogelson (1961): REVIEW OF CRITERIA FOR ESTIMATING TO DAMAGE FROM BLASTING VIBRATIONS, U. S. Bureau of Mines
- (4) 吉川宗治 (1970): 爆破と振動 土木学会岩盤力学委員会研究会
- (5) 吉川宗治, 小林芳正, 佐藤忠五郎, 望月 宏(1977): 坑道内の地震探査における種々の波の利用 第5回岩の力学国内シンポジウム
- (6) 桜井春輔, 北村泰寿, 吉田耕造(1977): 近接発破によるトンネル覆工および周辺地盤の振動性状 第5回岩の力学国内シンポジウム
- (7) 伊藤一郎, 佐々宏一(1970): 爆破振動の軽減法についての実験報告書 京都大学 西松建設 旭化成
- (8) 伊藤一郎, 寺田 孚, 佐々宏一(1969): 国鉄湖西線長等山下り線トンネル掘進発破が疎水トンネルにおよぼす影響調査総括報告書 日本材料学会