

# 発破振動の影響予測の1方法

内山成和

## A METHOD OF FORECASTING THE EFFECTS OF BLASTING VIBRATION ON STRUCTURES

Shigekazu UCHIYAMA

### Abstract

It frequently becomes necessary to forecast vibration amplitude and its effects on nearby structures in situations where blasting is used in excavation for tunnels, pipelaying for water supplies or sewage, slope cutting, ground leveling for road or residential construction, quarrying, etc. A frequently used method of forecasting effects on structures is to set off explosions small enough not to damage nearby structures, measure resulting ground vibration and structural vibration, and from this data, make a forecast.

However, it is often the case that circumstances do not permit the carrying out of such tests. In such circumstances, another forecasting method that is being used employs formulas for vibration amplitude and distance between blasting and receiving points and for size of charge that have been proposed by a number of researchers. The formulas give values for vibration amplitude at surface structure locations. On the basis of established relationships between vibration amplitude at the surface and effects on structures, an estimate is made of damage that would be incurred.

By this procedure, the effects on structures are assumed to be related to nothing more than vibration amplitude at the surface. However, the effects on structures are also related to vibration amplitude at structure locations, spectral characteristics (i. e., spectral characteristics of vibration source, propagation characteristics of the ground, spectral characteristics of the structures) and duration of vibration. Even if it was valid to take only vibration amplitude into account as a first approximation, it is hardly adequate for an approximation of the actual condition.

This paper describes a method for forecasting effects of vibrations on structures that takes into account spectral characteristics as well as vibration amplitude for use in situations where it is impractical to carry out full-scale blasting experiments.

Figure 1 is a schematic outline of this method. As shown in the diagram, surface output spectra at structural locations are calculated from spectra of the source and of the ground. The effects of these output spectra on structures are calculated to obtain response spectra and thus allow estimation of vibration effects.

In order to determine spectra of sources theoretically, a number of parameters for the blasting material and the ground would be necessary. Unfortunately, however, it is not theoretically possible to determine the necessary parameters for the blasting material or for the ground. Therefore, the authors have resorted to the use of measurement data taken during excavation in rock ground in an attempt to determine the spectra of vibration sources. In this method of obtaining the spectrum of the vibration source, a spectrum obtained at a point on the ground is divided by the spectrum of the wave produced between the source and the surface

receiving point. To calculate ground spectra, the authors used Haskell's method.

It was necessary to determine the following factors: type of wave, angle of incidence of wave as it passes from the vibration source to the next layer, velocity, layer structure of the ground, density and damping coefficient of the ground.

Figure 2 shows an example of a vibration waveform record taken of a blast. In this figure, the phase velocity, which indicates maximum amplitude, is 3000 m/sec. Velocity is the same as P-wave velocity measured by seismic exploration in the same region. Figure 3 shows the locus of the motion. It is clear from this figure that the amplitude of vibration from the blast is greatest in the direction of propagation, while it is small at right angles to this direction.

The above results were the same for all blasting vibration measurements that were carried out by the authors. Further, the major part of waves produced by blasting may be regarded as P-waves.

Because it is impossible to calculate angle of incidence from different waves with the same vibration source and receiving point by an analytical formula, a computer using a trial and error approach was resorted to. Figure 4 is a schematic outline of the calculation process. Figure 5 shows the velocity layer structure, density, etc. of the ground in which the records that were used in the calculations were taken mainly. Table 1 gives data on the blasts that were carried out. The velocity values in Figure 5 were determined by seismic exploration, while the density values were assumed. Damping coefficient of the ground was uniformly assumed to be 0.5%.

Figures 6(1) and 6(2) were prepared in order to show the relationship between vibration spectra as obtained by calculation and the size of the charge. In Figure 6(1) (a), the peaks of the source spectra progressively decrease in frequency from 1 to 3, while 4 and 5 show no change in spectral peak. In Figure 6(1) (b), a larger amount of explosive was used, while spectra 2 through 4 show almost no change in peak frequency. In Figure 6(2), even larger quantities of explosives were used. Here, the spectra of the source hardly change at all. Variations in these spectra are due to unsuitable excavation of the rock. It can be said that as long as excavation is carried properly, there is no fluctuation in source spectra, regardless of amount of explosive used.

In Figure 6(1) (a), the rock at the blasting point is tuff. In 6(1) (b), it is breccia, and in Figure 6(2), basalt. Frequency of spectral peak in Figure 6(1) (a) is approximately 30 Hz, in 6(2) (b) approximately 50 Hz, and in Figure 6(2), approximately 60 Hz. Thus, as one goes from soft to hard rock, the spectral peak shifts slightly to higher frequencies. It may be supposed that spectral peak frequency also varies according to type of rock.

Figure 7 shows source spectra obtained by calculation using records in which the correct quantity of explosive was used in rock excavation.

It would not be unsuitable to classify all of these spectra into two groups, disregarding minor variations in spectral peak, that is, those spectra peaking around 30 Hz (Figure 7(a)) and those peaking between 40 and 50 Hz (Figure 7(b)). In Figure 8, spectrum A represents the average of all calculated that peak around 30 Hz. Spectrum B is the average of all calculated spectra that peak around 40 to 50 Hz. Ave. is the average of all calculated spectra, derived for reference.

Figure 9 shows vibration source wave patterns obtained by conducting inverse Fourier transformation of the above source spectra. In the calculations, harmonic averages of amplitudes were taken, while for phase, mathematical average was used. Table 2 shows the waveform data of Figure 9 digitally.

Next, the paper verifies the applicability of source spectral patterns derived by the above method. Using spectral patterns obtained by calculation, the output spectra at the surface is calculated for comparison with actually measured spectra. The spectra used in this comparison are not the same as the vibration source spectra.

Figures 10(1), 10(2) and 10(3) are examples of comparisons. Figure 10(1) is an

example in which output spectra at the surface is calculated on the basis of source spectral pattern A. It agrees well with actually measured spectra. In Figure 10(2), pattern B and in Figure 10(3), pattern Ave. were used in calculations. Here too, calculated spectra agree well with actually measured spectra.

It is clear from these figures that there is very close agreement between output spectra at the surface obtained by calculation and actually measured spectra. It can be said that the use of the above mentioned method to calculate source spectral patterns is appropriate and that there is no problem involved in using Haskell's method to calculate blasting vibration. It would appear that particularly good agreement between calculated and actually measured spectra is obtained when source pattern A is used (out of 31 trials using pattern A, agreement was shown in 19 instances). However, it is not clear which pattern should be used for which circumstances. It is recommended that for the sake of safety, A, B and Ave. all be used in calculations to forecast the effects of vibrations on structures.

Source spectral pattern is used to calculate the ground output spectral pattern. This spectral pattern is then subjected to inverse Fourier analysis to obtain a waveform record. Next, the response spectra from structures for this waveform is calculated. Figure 11 shows the response spectra thus obtained.

According to these results, if natural period of the structures is within the range 0.015 seconds (67 Hz) to 0.035 seconds (29 Hz), and damping coefficient of the structures is within the range 0% to 5%, vibration amplitude increases over 1.5 times, with a maximum of over 5 times.

Figure 12 shows an example of spectral characteristics of structures. In this example, the spectral peak of the structure is between 30 and 80 Hz. Within this range, vibration increases by a factor of over 1.5 times to a maximum of 5 times. Among examples of actual measurements of amplitude increases of blasting vibration received by structures, if the structures are not hard, increases of from 1.5 to 5 fold are shown.

Figure 13 shows the relation between acceleration amplitude at the ground and structures that obtained from measurement of blasting vibration. This figure indicates that acceleration amplitude at structures increases of from 1.5 to 5 times at the ground.

Consequently, if we assume that spectral peak of structures is between 30 Hz and 80 Hz, the standard method for determining the response spectra of structures agrees fairly well with actually measured responses of structures.

Amplitude characteristics of structures for given input waveforms was calculated using response spectra. The input, which is the vibration amplitude at the surface, is expressed by the following formula, which was derived by the authors as a result of analysis of records of explosions that were carried out:

$$\text{Acc} = 11000 \cdot R^{-2.18} \cdot W^{0.59}$$

where, Acc=vibration acceleration peak value (gal)

R=distance of receiving point from blasting point (m)

and W=blasting charge (g).

Supposing that there is a distance of 100 meters and a charge of 1000 grams, according to the formula, the vibration amplitude on the surface is 28 gal. If natural period and damping factor of the structure is 0.02 seconds (50 Hz) and 5% respectively, from Figure 11 we find that the amplitude increase is 3.5 times. Thus, the vibration amplitude of the structure is 100 gal.

In the above we have mentioned a method of forecasting the effects on structures of vibration incorporating not only vibration amplitude at the surface as factors but also spectral characteristics, for use when experimental blasting is impracticable. Because the forecast method takes into account both ground conditions and structural conditions, it can be considered to be more suitable than methods which take into account no more than vibration amplitude at ground surface. The authors intend to continue to accumulate data to deal with these problem areas.

## 1 まえがき

トンネル掘削、上下水道の管路埋設溝掘削、道路建設や宅地造成のための斜面掘削あるいは盤下げ掘削、また採石などの発破掘削工事において、工事を円滑に進捗させるためには、事前に発破により発生伝播する振動の大きさおよびその振動が、周辺構造物に及ぼす影響を予測しなければならないことがしばしばある。

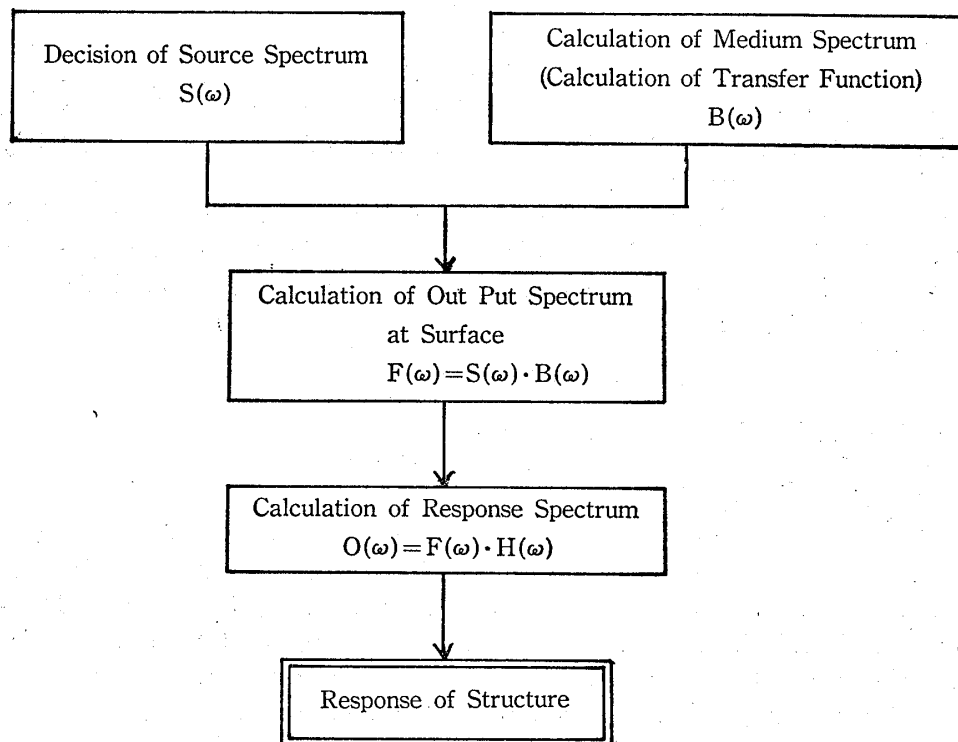
構造物に対する影響を予測する最も直接的な方法は、従来よく行なわれているように、構造物のある場所において、構造物に損害を与えない程度の少量の薬量での試験発破を行ない、その時の地盤および構造物の振動を測定し、その結果から予測する方法である。この方法は、対象とする現地条件での試験であり、影響を予測するためには最も確実な方法であると言える。

しかしながら、いろいろな事情によって、実際に現地で試験発破を実施することが困難な場合がしばしばある。このような場合の予測方法としては、多くの研究者によって提案されている、振動の大きさと距離、装薬量の関係を利用して、構造物箇所の地盤上での振動の大きさを算出し、一方、実験によって求めた地盤上の振動の

大きさと構造物に対する影響との関係を用いて、その影響度合を推定することが行なわれている。この場合、構造物に対する振動の影響度合は、単に地盤上の振動の大きさのみが関与することになる。

しかしながら、振動が構造物に及ぼす影響の度合は、構造物箇所の地盤の振動の大きさとともに、そのスペクトル特性（振源のスペクトル特性、伝播径路である地盤の振動伝達特性、構造物のスペクトル特性）および振動の継続時間に応じて異なるものであり、振動の大きさのみで影響度合を定めることは、第1近似として成立するとしても、実態の推定に対しては、程遠いものと言わざるを得ない。

すなわち、振源で発生し地盤中を伝播してきた振動の任意の点におけるスペクトル特性と、構造物のスペクトル特性が全く同じ特性を有しているとしても、振動が1～2波で終了するようなものであるならば、構造物の振動は、それほど大きくはならない。また、地盤の振動がかなり大きなものである場合でも、地盤と構造物のスペクトル特性が著しく異なれば、構造物の振動はそれ程大きくはならない。これに反して、地盤の振動が小さなものであっても、地盤と構造物のスペクトル特性がほとん



図一1 振動による構造物への影響予測のための流れ図

Fig. 1 Flow chart for the forecast of the effect on structure by vibration

ど等しく、振動が継続する場合には、構造物の振動は大きなものになる。

したがって、現地での試験発破を実施することが困難な場合に、振動の大きさのみならず、振動のスペクトル特性などを考慮した発破振動の構造物に対する影響の予測方法について述べる。

## 2 予測方法の概要

一般に、振源から発生し、地盤中を伝播する振動の地盤上の任意の点における出力のスペクトル $F(\omega)$ は、周波数領域表示で示すと、

$$F(\omega) = S(\omega) \times B(\omega) \quad (1)$$

で表わされる。 $S(\omega)$ は振源のスペクトル、 $B(\omega)$ は媒質である地盤のスペクトルである。すなわち、地盤上の任意の点における出力スペクトルは、振源のスペクトルおよび地盤のスペクトルが明らかになれば、その積より求められる。

また、地盤における出力スペクトル $F(\omega)$ に対する構造物の応答スペクトル $O(\omega)$ を、同じく周波数領域表示で示すと、

$$O(\omega) = F(\omega) \times H(\omega) \quad (2)$$

で表わされる。ここで、 $H(\omega)$ は構造物のスペクトルである。

(1)式および(2)式の関係を用いれば、振源のスペクトルおよび地盤のスペクトルを求めて、構造物箇所の地盤上の出力スペクトルを計算し、それを構造物に作用させ、その応答を求めることによって、影響予測を行なうことができる。

図-1は、予測方法の流れを示したものである。

## 3 振源のスペクトルの決定

爆薬の爆発源およびその近傍での挙動に関する理論的あるいは実験的な研究は、これまで多くなされている。

例えば、国内では地震探鉱実験グループや他の多くの研究者が、爆破による波動に関する研究の中の一環として、爆薬爆発による振源でのスペクトル、あるいは振源近傍の弾性波動などに関して、実験的または理論的研究を数多く行なっている。また、国外においても、同様に幾多の研究がなされている。

しかし、岩盤の掘削工事のような爆薬爆発の場合の振源特性の検討には、そのままでは適用し得ないと思われ

る。

振源特性を理論的に決定しようとする場合、爆薬や地盤に関する各種のパラメーターを仮定しなければならない。しかし、調べようとする地盤に関するそれらのパラメーターを適確に定めることは不可能である。

そこで、筆者らが今までに行なった岩盤掘削による振動測定記録を用いて、振源のスペクトル特性を求めることを試みた。

### 3-1 振源のスペクトルの計算

#### 3-1-1 振源のスペクトルの計算方法

振源のスペクトル $S(\omega)$ は、(1)式を変形すると、

$$S(\omega) = F(\omega) / B(\omega) \quad (3)$$

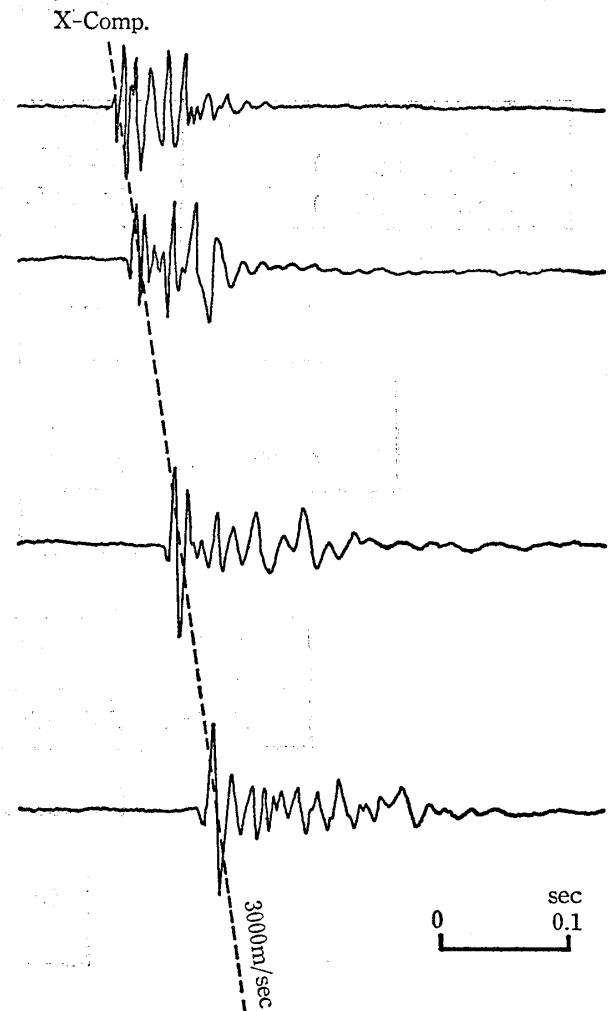


図-2 発破による振動の伝播の1例  
Fig. 2 An example of the propagation of vibration by the blasting

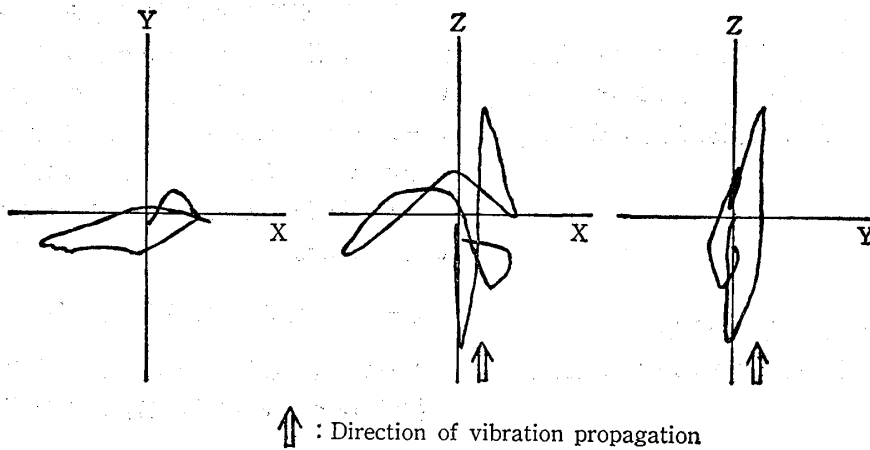


図-3 運動の軌跡  
Fig. 3 Locus of motion

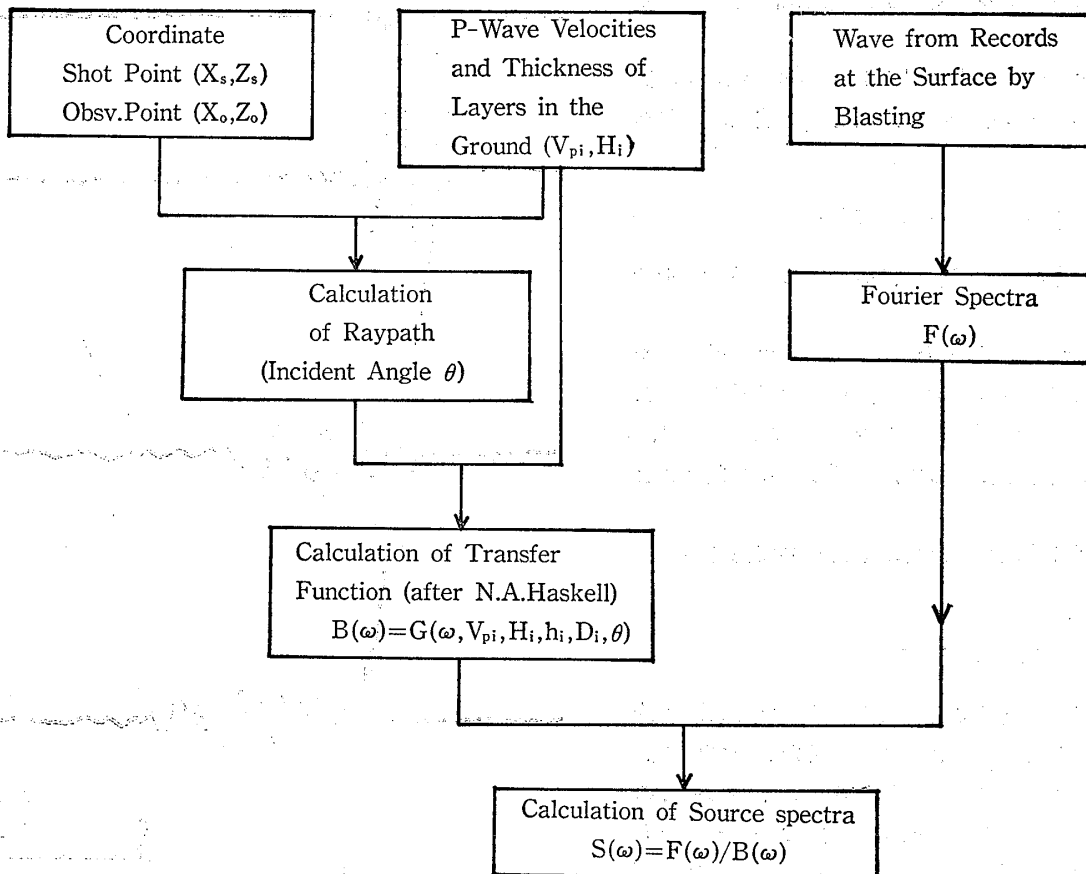


図-4 振源のスペクトルの計算のための流れ図  
Fig. 4 Flow chart for the calculation of source spectra

表一 発破による地盤振動の測定条件  
Table 1 The condition of measuring of ground vibration by blasting

Point Number	1	2	3	4
Rocks at Blasting Point	Slate	Lapilii Tuff	Conglomerate	Granite
Distance from Blasting Point to Observation Point(m)	6—30	10—30	5—30	10—30
Explosive Material	dynamite	dynamite	dynamite	dynamite
Charge Size(g)	33—200	50—800	1500—4000	1000—5000
Blasting Pattern	Borehole	Borehole	Trench Excavation	Trench Excavation

と表わされる。すなわち、振源のスペクトルは、任意の点において観測された振動測定記録のスペクトルを、振源と受振点間の地盤のスペクトルで除すことによって得られる。

振源と受振点間の地盤のスペクトルは、地盤中を伝播する波の種類、地盤の速度層構造、密度、減衰定数および入射角が定まれば求められる。

図一に発破による振動記録の1例を示す。図中の最大振巾を示す位相の速度は、3000m/secであり、この速度は、当箇所で行われた弾性波探査、あるいはPS検層から得られた地山のP波速度に一致する。図一には、最大振巾を示す位相部分の地盤の運動の軌跡を示す。図のX軸は振動伝播方向の水平動成分、Y軸はそれに対して直角方向の水平動成分、Z軸は上下動成分である。図より明らかなように、発破により発生伝播する振動は、振動伝播方向の振巾が大きく、それに対して、直角方向の振巾は小さい。このような結果は、筆者らの行った発破振動測定の場合に共通して言える。

以上の点から、発破により発生伝播する波の主要な部分は、P波と見なすことができ、振源のスペクトルの計算は、波をP波として扱うこととする。

計算の方法は

① 初めに、地盤のP波速度構造および発破点と受振点の座標を用いて、発破点地層よりその上位の地層に振動が入射する角度の計算を行なう\*。

② つぎに、この入射角、P波速度構造および仮定した密度と減衰定数から、Haskellの方法を用いて、発破

点と受振点間の地盤のスペクトルを算出する。

③ 一方、実測の振動波形記録をフーリエ変換し、出力スペクトルを求める。

④ 出力スペクトルを発破点と受振点間の地盤のスペクトルで除して、振源のスペクトルを算出する。

図一に、この計算の流れ図を示す。

### 3-1-2 振源のスペクトル計算結果

上記の方法による振源のスペクトルの計算に用いた試験発破の条件を表一に示す。これらの記録は、P波の速度構造が判明しており、振動が下層より上層に伝播するというHaskellの計算方法が適用できるものである。

図一に計算を行なう4地点の速度層構造他を示す。

計算を行なう成分は、既述のように、発破振動の場合に大きな振巾を示す振動伝播方向の水平動成分(X成分)である。地盤上の実測記録のスペクトルを計算した結果、100Hz以上の振動数にはスペクトルのピークはほとんどないことが確認され、0Hzより最高100Hzまでとして、計算を行なうこととした。そして、地盤の減衰定数は、一律に0.5%としている。また、使用する記録は、

\*波がある層より他層に入射する場合、入射角と屈折角の関係はスネルの法則に従うが、発破点と受振点の位置関係に一致する入射角を解析的に求めることはできない。そのため、入射角の算出は、発破点からの波の射出角を仮定し、スネルの法則に従って、逐次上層への屈折角と径路を計算し、受振点位置に一致するまで射出角を変え、入射角を求める。

Pt. No.1

	$\rho$	V	H
Silt	1.5	0.25	1.5
Sand & Gravel	2.0	0.60	2.0
Slate	2.3	1.50	3-8

Pt. No.2

	$\rho$	V	H
Weathered Layer	1.5	0.50	1.0
Lapilli Tuff	2.4	2.50	5-15

Pt. No.3

	$\rho$	V	H
Clay with Gravel	1.8	0.60	1.0
Sand & Gravel	2.0	1.50	1.0
Conglomerate	2.3	2.00	4-5

Pt. No.4

	$\rho$	V	H
Weathered Granite	2.0	0.60	10-12
Granite	2.4	3.00	2-5

$\rho$  : Density (g/cm<sup>3</sup>)

V : P-Wave Velocity (km/sec)

H : Thickness of Layer (m)

(Thickness of Lower-layer is Distance from Upper Surface of its Layer to Shot Point)

図-5 地盤の密度、P波速度および層厚

Fig. 5 Density, P-wave velocity and layer's thickness of ground

S/N比の大きな発破点より約30m以内の距離にある測定点で得られた記録とした。

計算により得られた振源のスペクトルについて、装薬量の違いによる変化を図-6(1)に示す。図-6(1)(a)の1より3までの振源のスペクトルのピークは、除々に低い振動数の方に移行し、4および5のスペクトルのピークの振動数には、ほとんど変化がみられない。1より3までの振源スペクトルは、装薬量が少なかったため、満足した掘削ができなかったものであり、4と5は適正な掘削が行なわれたものである。

図-6(1)(b)は、(a)に比べ装薬量が多い場合の例である。(b)の1は、若干少なめの装薬で、一部掘削されない部分が残った発破の場合、2、3および4はいずれも適正に掘削された場合のものである。2から4までの振源のスペクトルのピークの振動数は、変らないと言える。

図-6(1)に示した場合よりも、より大装薬量の場合の振源のスペクトルを、参考までに図-6(2)に示す。なお、このスペクトルは、振動数300Hzまで求めてある。この場合は、いずれの装薬量においても、岩盤を適正に掘削しており、スペクトルのピークの振動数は、装薬量による変化はみられない。

以上の例で明らかなように、同一岩種の岩盤を適正に掘削した場合は、装薬量を増減しても、振源のスペクトル

は変らないと言える。

また、図-6(1)(a)は、発破点の岩種が凝灰岩、図-6(1)(b)は礫岩、参考までに示した図-6(2)は玄武岩の場合の振源スペクトルである。図-6(1)(a)のスペクトルのピークの振動数は30Hz前後、図-6(1)(b)は約50Hz、図-6(2)は約60Hzであり、軟岩より硬岩になるに従って、スペクトルのピークは高い振動数の方に移行しており、岩石の種類によって、振動のスペクトルのピークの振動数が異なることが考えられる。

適正に岩盤を掘削した場合、装薬量を増減しても、振源のスペクトルは変化しないという結果をふまえて、適正装薬量状態の記録を用いて求めた振源のスペクトルを図-7に示す。

### 3-2 振源スペクトルのパターン化

計算の結果得られている振源のスペクトルから、振源スペクトルのパターンを作成するに当たって、図-7の振源スペクトルのピークを、個々のピークの値に拘泥せず、パターンとして見た場合、主なピークが30Hz前後にあるもの(図-7(a))と、40Hzより50Hzの範囲にあるもの(図-7(b))の2つに分けて差しつかえないと思われる。

そこで、振源のスペクトルを2つのグループに区分



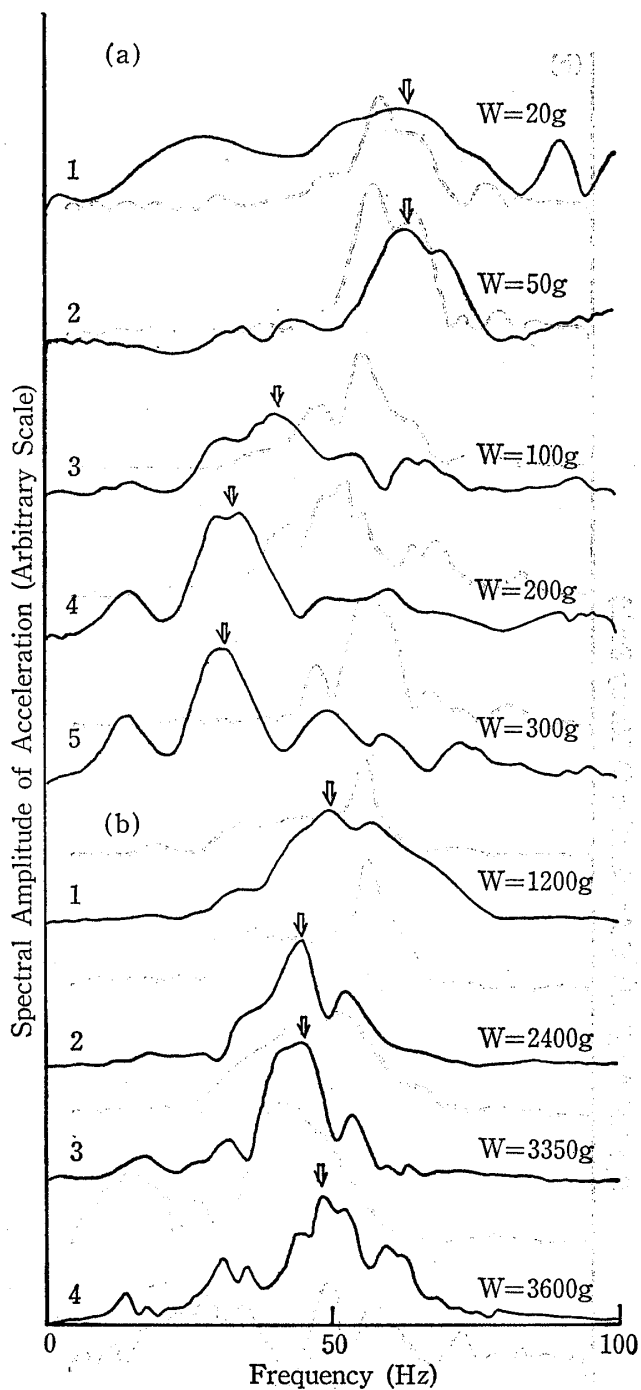
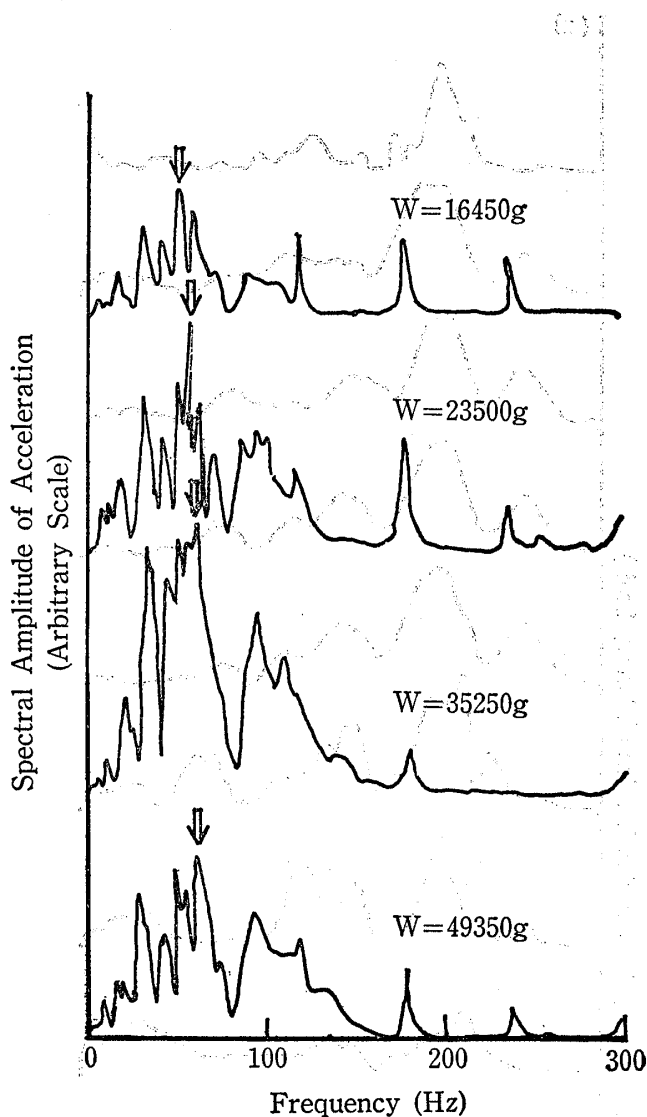


図6—(1) 振源のスペクトルと装薬量との関係(1)  
 Fig. 6(1) Relation between source spectra and charge size(1)

し、各々の平均の振源のスペクトルを求め、パターン化したものを図—8に示す。Aは30Hz前後、Bは40Hzより50Hzの範囲にピークを有する振源の平均スペクトル、Ave. は全振源の平均スペクトルである。この振源の平均のスペクトルの算出に当たって、各スペクトルを単純に算術平均すると、各スペクトルの絶対値に大小があるた



図—6(2) 振源のスペクトルと装薬量との関係(2)  
 Fig. 6(2) Relation between source spectra and charge size(2)

め、得られる平均スペクトルは、絶対値の大きい方のスペクトルの重みがより大きくかかったものとなる。各スペクトルの重みの差異を除き、同等の重みで平均されたスペクトルを得るために、スペクトルの平均は相乗平均で行なった。なお、振源の波形パターンのデジタル値を表—2に示す。

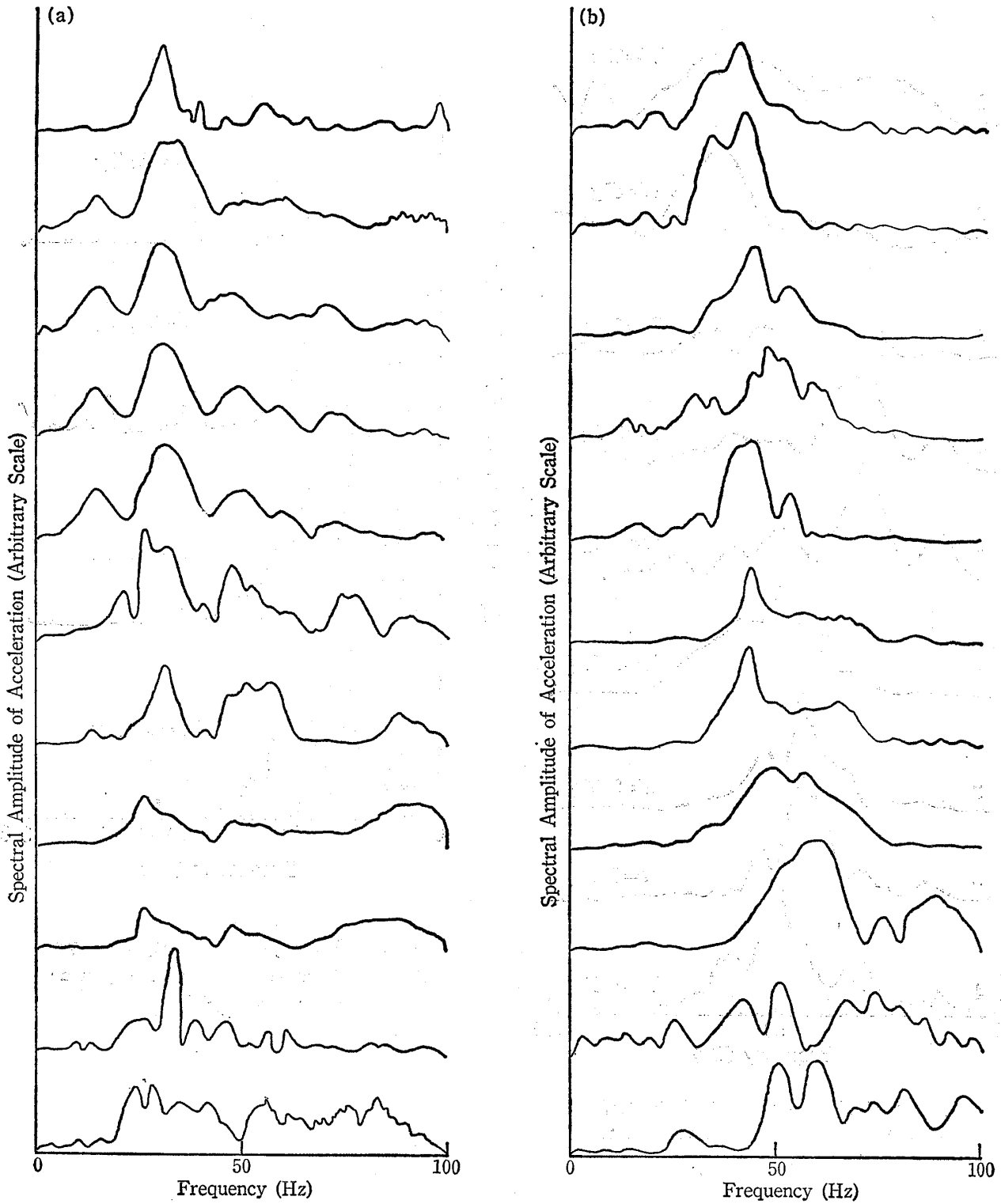


図-7 振源のスペクトルの計算結果  
Fig. 7 Calculated result of source spectra

上記平均により得られた振源のスペクトルパターンを逆フーリエ変換をして求めた波形パターンを図-9に示す。なお、波形パターンに変換するために必要な波形パターンの位相は、AおよびBのグループの平均の場合には、それぞれのグループのスペクトルの位相の算術平均値を、全平均の場合には、全スペクトルの位相の算術平均値を用いている。

### 3-3 振源のスペクトルパターンの検証

図-8に示す振源のスペクトルパターンを用いて計算した地盤上の出力スペクトルと、実測された地盤上のスペクトルの比較を図-10(1)、図-10(2)および図-10(3)に示す。

比較に用いる実測のスペクトルは、振源のスペクトルの算出に用いた発破点近傍の測定点のものではなく、より遠方の測定点のものである。また、地盤上の出力のスペクトルの計算は、A、Bおよび全平均の3種の振源のスペクトルパターンを用いて行なった。

計算を実施した個数は全部で31であり、図-10(1)に示す19例は、Aの振源のスペクトルパターンを用いたもの、図-10(2)の10例は、Bのパターン、図-10(3)の2例は、全平均のパターンを用いて計算したものである。いずれの計算例においても、計算によって求めた地盤上の

出力スペクトルと、実測のスペクトルはよく合致している。

上に述べたように、図-8に示す振源のスペクトルパターンを用い、Haskellの方法によって、地盤上の出力スペクトルを算出する方法は、現地における試験発破の実施が困難な場合に、発破振動を予想するために利用することができる。しかし、3種の振源のスペクトルパターンのうち、最適のパターンの選択については、今後の検討を要することであるが、とりあえず、これらの3種のパターンを用いて計算し、それらの結果を用いて、構造物に対する影響を判断すればよいと考える。

### 4 発破振動に対する構造物の応答

前節に述べた方法によって、構造物箇所の地盤の振動が算出される。その振動に対する構造物の変位応答  $O(\tau)$  は、

$$O(\tau) = -\frac{1}{P_d} \int_0^t F(t) \cdot e^{-P_d \cdot h(t-\tau)} \sin P_d(t-\tau) \cdot d\tau \quad (4)$$

を用いて計算される。ただし、 $P_d$ は構造物の減衰固有円振動数、 $h$ は構造物の減衰定数、 $F(t)$ は時間領域表示の加速度である。

しかしながら一般には、構造物の応答を表わすには、

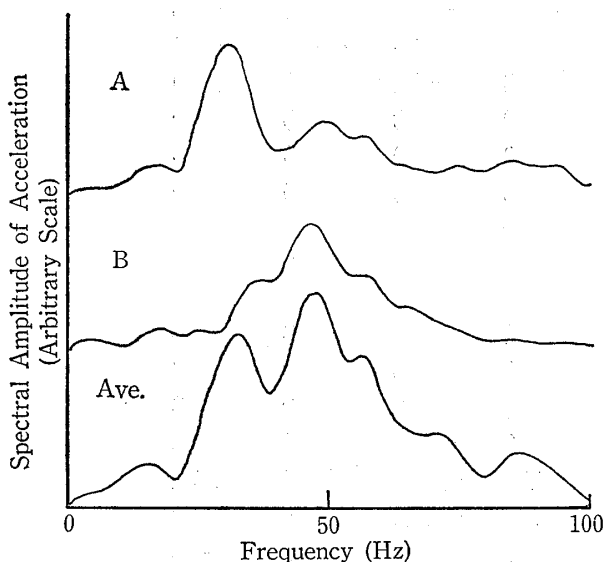


図-8 振源のスペクトルから求めた振源のスペクトルパターン

Fig. 8 Spectral pattern of source calculated from source spectra

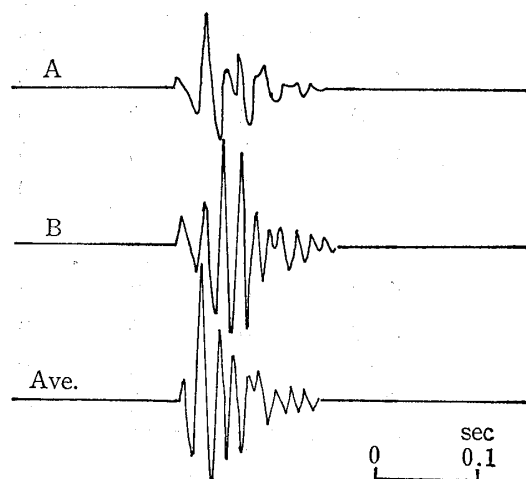


図-9 逆フーリエ変換によってスペクトルパターンから求めた加速度の波形パターン

Fig. 9 Acceleration waveform pattern of source calculated from spectral pattern by inverse Fourier transform



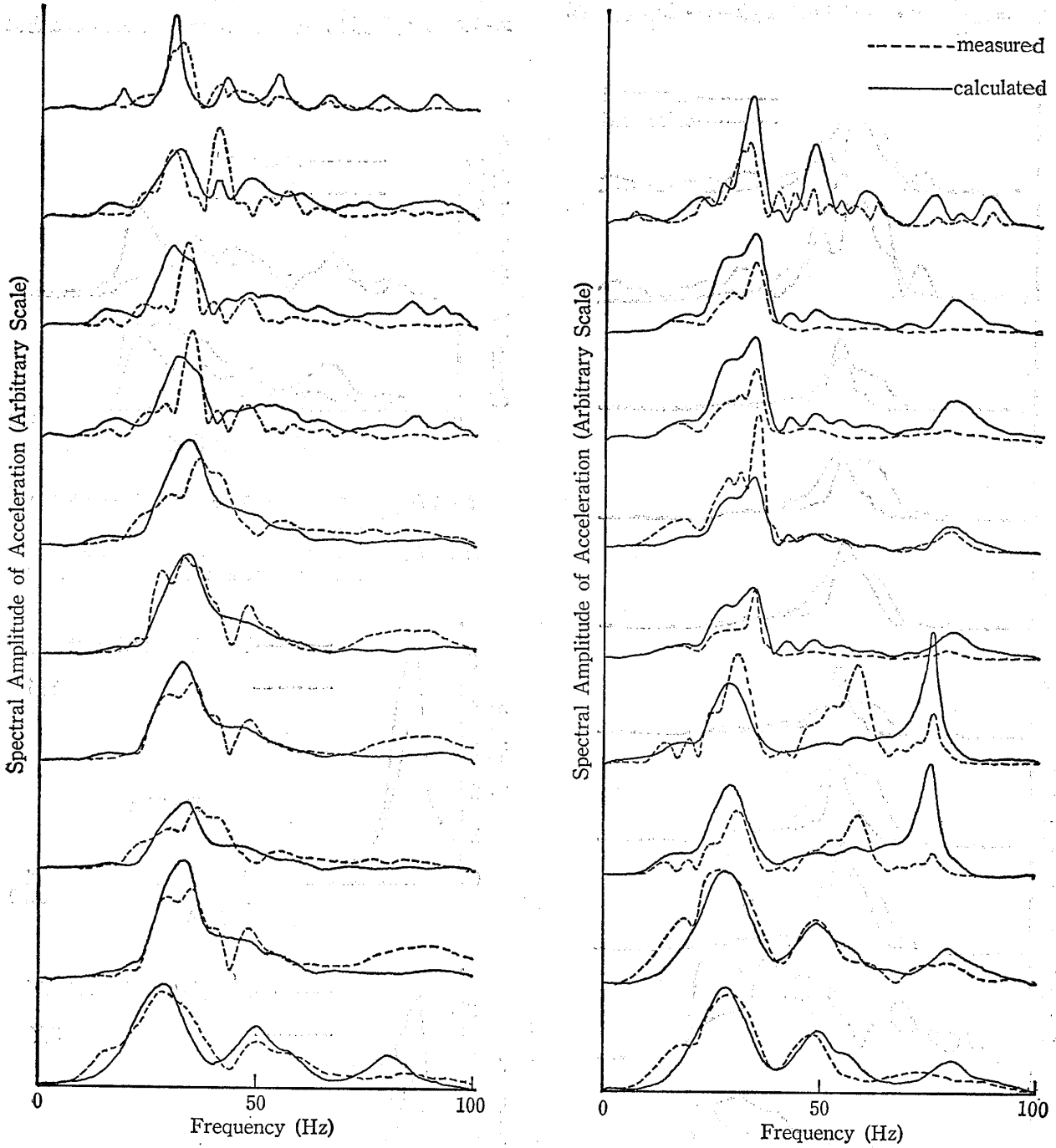


図-10(1) 地表での実測スペクトルと計算スペクトルの比較(1)  
Fig. 10(1) Comparison between measured and calculated spectra at the ground surface(1)

構造物の固有振動数（普通はその逆数の固有周期）を変化させ、それぞれの固有振動数ごとに  $F(t)$  に対する最大応答値を求める応答スペクトルが用いられる。すなわち、

$$O_{acc} = P_d \left| \int_0^t F(t) \cdot e^{-P_d \cdot h(t-\tau)} \sin P_d(t-\tau) \cdot d\tau \right|_{max} \quad (5)$$

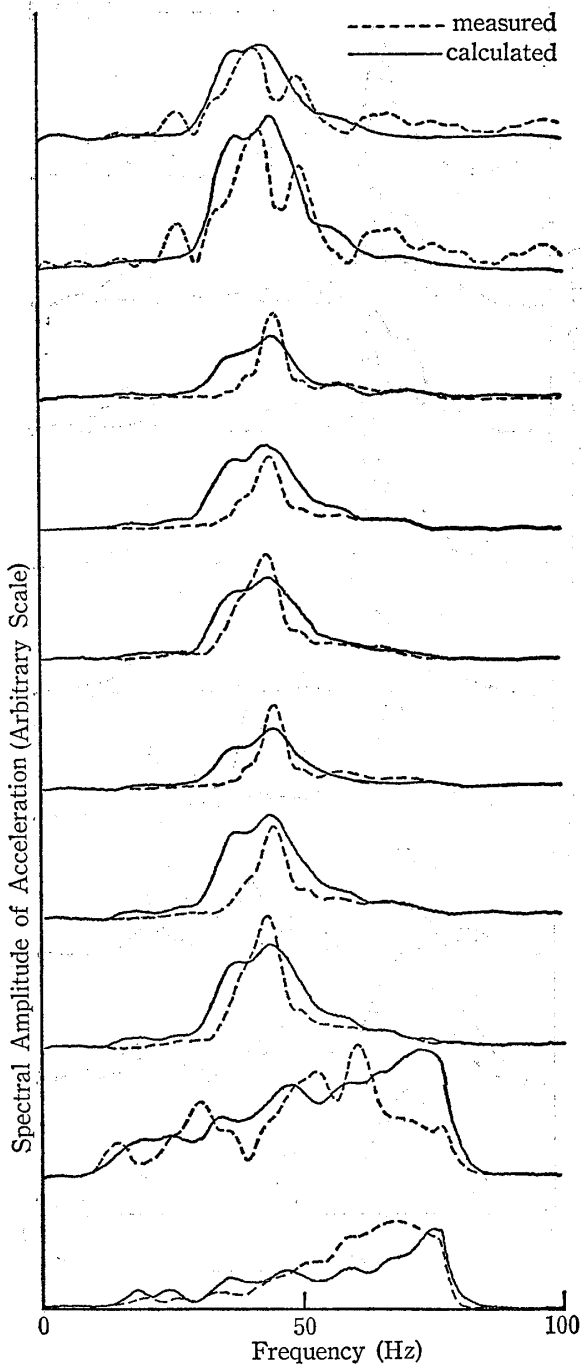


図-10(2) 地表での実測スペクトルと計算スペクトルの比較(2)

Fig. 10(2) Comparison between measured and calculated spectra at the ground surface(2)

である。  $O_{acc}$  は、加速度の応答であり、速度の応答を得る場合は、(5)式を固有円振動数で割ることによって求められる。

振動のスペクトルパターンAを用いて、地盤上の出力スペクトルを計算し、それを逆フーリエ交換することに

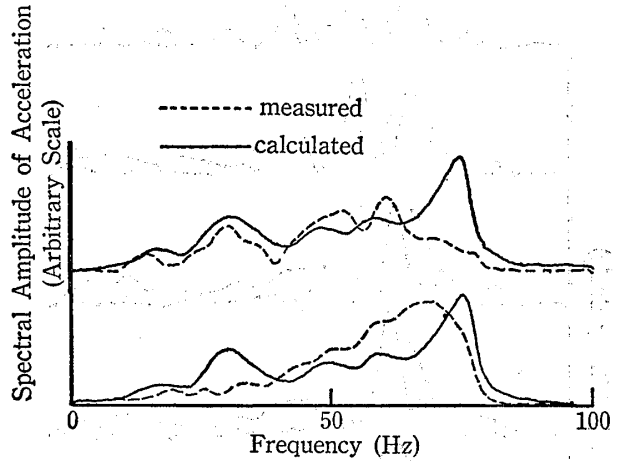


図-10(3) 地表での実測スペクトルと計算スペクトルの比較(3)

Fig. 10(3) Comparison between measured and calculated spectra at the ground surface(3)

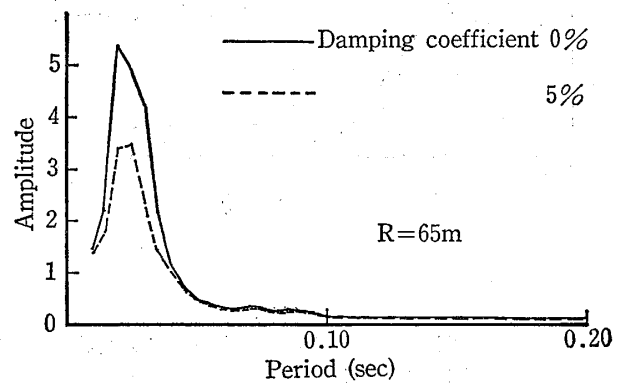
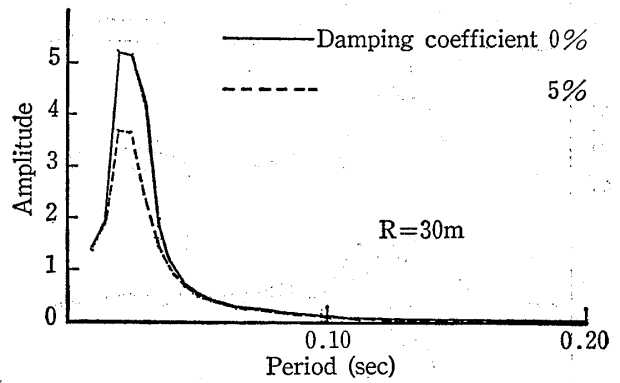


図-11 応答スペクトルの計算例

Fig. 11 Examples of response spectra

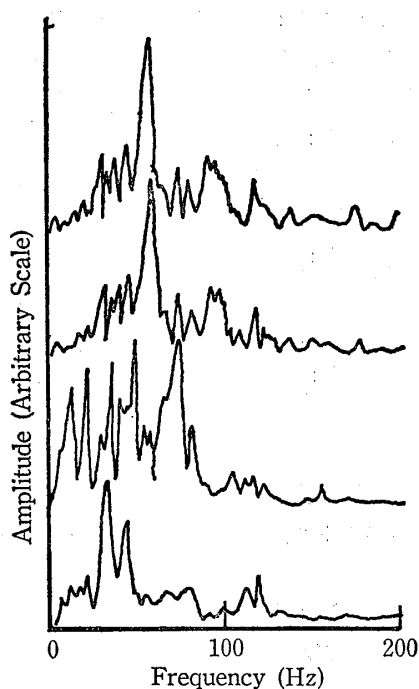


図-12 構造物のスペクトル (伝達関数)  
Fig. 12 Examples of structure's spectra (Transfer function)

よって、地盤の出力スペクトルを時間領域表示の加速度  $F(t)$  になおし、(5)式を用いて、加速度の応答スペクトルを求める。その1例を図-11に示す。図の横軸は構造物の固有周期、縦軸は構造物の振動増巾度である。この計算に用いた構造物の減衰定数は、0%および5%の2種である。R=30mおよび65mの両地点ともに、振動が構造物に入力した場合、減衰定数0%で固有周期が0.015秒(67Hz)から0.035秒(29Hz)の範囲では、約2倍から最大で約5倍、また減衰定数5%では、1.5倍から最大で3.5倍に振動が増巾されることを示している。

一方、試験発破での振動測定記録を用いて算出したある構造物のスペクトル特性の例を、図-12に示す\*。この例によれば、発破振動によって励起される構造物の振動のスペクトル伝達関数のピークは、およそ30Hzから80Hzの範囲にある。

また、図-13には、構造物箇所地盤上と構造物内での実測の振動の大きさの比較を示す。測定を行なった構造物は、いずれも木造家屋である。図より明らかなように、構造物内の大きさは、構造物箇所地盤上の振動の大きさの1.2倍から6倍の範囲にあり、大部分のものは、1.5倍

\*これらのスペクトルは、構造物内床上のスペクトルを、構造物箇所地盤上のスペクトルで除して得たものである。

から5倍となっている。

以上に述べたように、振源のスペクトルパターンを用い、Haskellの方法によって、構造物箇所地盤の出力を計算し、構造物のスペクトルのピークを30~80Hz間にあると仮定し、構造物に上記出力を作用させて構造物の応答を求めることは、実際の発破振動に対する構造物の応答を、かなり適確に表わしていると考えられる。

### 5 あとがき

以上、実測の発破振動測定記録から、振源のスペクトルの特性について検討を行ない、得られた振源のスペクトルパターンを用いて、Haskellの方法により地盤上の出力を計算し、その出力を構造物に作用させた応答スペクトルを求め、構造物に対する振動の影響を予測する方法について述べた。

この方法は、従来一般的に行なわれているところの実験式より地盤上の振動の大きさを推定し、その結果から構造物に対する影響を推定する方法に比べて、地盤条件、構造物条件を考慮していることから、より適切な方法と考える。

しかしながら、この方法は、実際に現地で試験発破に

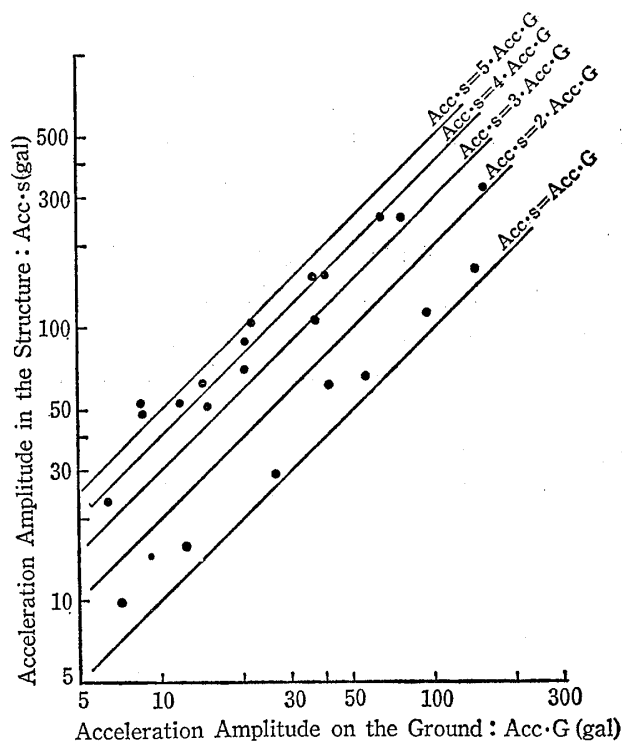


図-13 構造物箇所地盤と構造物内の振動加速度の関係図  
Fig. 13 Relation between the Acceleration Amplitude at the Ground and the Structures

よる振動測定を行ない、その結果をもとに構造物に対する影響を検討する方法に取って替るものではなく、初めに記したように、現地での試験が困難な場合に、影響を予測するための一方法である。

なお、異なった条件の地点での適応性、また、どのような条件の場合に、いずれの振源スペクトルパターンを用いるべきかなどについて、今後、さらに検討を行なうつもりである。

### 参 考 文 献

- 青木治三 (1958) : 震源附近の弾性波 地震探鉱実験グループ, 15, pp.468—482
- Aoki, h. (1960) : Seismic Wave in the Region Near Explosion Origin, J. Earth Sci., Nagoya Univ., 8, pp. 120—173
- Case, K. M. and J. F. Colwell (1967) : Elastic Wave Radiated from a Small Source, Geophysics, 32, pp. 52—59
- Duvall, W. I. and D. E. Fogelson (1961) : REVIEW OF CRITERIA FOR ESTIMATING TO DAMAGE FOR BLASTING VIBRATIONS, U. S. Bureau of Mine
- Grandell, F. J. (1949) : Ground Vibrations due to Blasting and its Effect upon Structures, T. Boston Sec., Civil Eng.
- Haskell, N. A. (1953) : The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media, Bull. Seism. Soc. Am., 43
- (1962) : Crustal reflection of plan SH waves, J. Geophys. Research, 65, pp. 4147—4150
- (1962) : Crustal reflection of plan P and SV waves, J. Geophys. Research, 67, pp. 4751—4767
- 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
- Kasahara, K. (1952) : Experimental Studies on the Mechanism of Generation of Elastic Waves, Bull. Earthquake Res. Inst., 30, pp. 259—268
- (1953) : Experimental Studies on the Mechanism of Generation of Elastic Waves, Bull. Earthquake Res. Inst., 31, pp. 245—254
- (1954) : Experimental Studies on the Mechanism of Generation of Elastic Waves, Bull. Earthquake Res. Inst., 32, pp. 67—78
- (1955) : Experimental Studies on the Mechanism of Generation of Elastic Waves, Bull. Earthquake Res. Inst., 33, pp. 411—418
- 笠原慶一 (1956) : 火薬爆発により発生する地震波初動部分のスペクトル解析 地震探鉱実験グループ, 9, p. 10—22
- (1959) : 火薬爆発による地震動の発生(1) 地震探鉱実験グループ, 17, p. 1—10
- Kislinger, C., E. J. Mateker, Jr. and T. V. McEvelly (1961) : SH Motion from Explosion in soil, Jour. Geophys. Res., 66, pp. 3487—3496
- Murphey, B. F. (1961) : Particle Motion in Halite, Jour. Geophys. Res., 66, pp. 947—958
- 内山成和, 大山卓夫, 金子史夫 (1979) : 発破振動の性状について 応用地質調査事務所年報 No. 1
- 内山成和, 大山卓夫 (1979) : 発破振動における振源特性の推定 物探学会, 昭和54年秋季講演会講演予稿集
- , ————— (1980) : 発破振動における振源特性の推定(その2) 物探協会, 昭和55年春季講演会講演予稿集
- 内山成和 (1981) : 発破振動の影響予測の一方法 物探学会, 昭和56年春季講演会予稿集
- 吉川宗治 (1970) : 爆破と振動 土木学会岩盤学委員会研究会