

**投稿論文 (和文)**  
**PAPERS**

# 発破振動における最大速度応答の 推定に関する一考察

宮地明彦<sup>1</sup>・河野健二<sup>2</sup>・古川浩平<sup>3</sup>・中川浩二<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本国土開発株式会社エンジニアリング本部

<sup>2</sup>正会員 鹿児島大学教授工学部海洋土木工学科

<sup>3</sup>正会員 山口大学教授工学部社会建設工学科

<sup>4</sup>正会員 山口大学教授工学部社会建設工学科

試験発破によって得られた観測波が不規則波としての特性を有することを考慮して、振動エネルギーの伝搬特性やパワースペクトル密度関数の時間変化、二乗平均応答と最大速度応答の関係等について解析を行った。特に振動エネルギーを利用した最大速度応答の簡単な推定法を示し、シミュレーションによる比較を行った。

**Key Words** : blast vibration, vibration energy, maximum velocity response

## 1. まえがき

発破を行う場合、それに伴う周辺地盤等での振動の大きさを予測しておくことが重要になる場合がある。発破振動は爆薬による衝撃が岩盤や地盤を通して周辺に伝搬するため高次の振動が主要なものとなる。また発破による衝撃の及ぶ範囲は比較的狭く、波動の伝搬と共にその大きさは距離減衰や内部減衰等により急激に減衰していくことが予想される。発破振動の大きさに関しては爆薬量や発破点からの距離の関数とする実験式が提案されているが、これらの提案式は大きな変動を有することが知られている。このため発破振動をより正確に把握するためには、波動の伝搬特性を明確にする必要があり、発破を行う地点及びその周辺での岩盤や表層地盤の動的特性を前もって知る必要がある。このような岩盤等の特性が既知であれば有限要素法等の数値解析法を利用して振動解析を行うことができる<sup>1)2)</sup>。しかしながら、発破を行う場合、その周辺の岩盤や表層地盤の動的特性が未知の場合がある。このような場合、試験発破によって得られた振動の結果を用いて、その伝搬特性を明確にし、最大応答の推定を行うことが必要になる。一般に構造物に関しては衝撃に対する応答スペクトルを用いると固有振動数が与えられれば最大変位応答は衝撃力の継続時間の関数として求められる<sup>3)</sup>。しかし発破振動のように表層地盤を含む広い領域を対象とする場合、その固有振動数は未知の場合が多く、また波動の伝搬とともに卓越振動数が変化することを考えると、スペクトル法の適用についても検討が必要になる。

一方、発破によって生じる振動は岩盤や表層地盤の特

性を反映し、不規則波としての特性を有している。このためトンネルの掘進発破に関して、発破振動スペクトルを用いて最大振幅を推定する方法が提案されている<sup>4)5)</sup>。この発破振動に伴う波動の不規則性を明確にすることにより、速度応答の推定が可能になるものと思われる。そこで試験発破によって得られた観測波を用いて、波動の伝搬特性について検討し、最大速度応答を推定することを試みる。

本研究では試験発破によって得られた観測波が不規則波としての特性を有することを考慮して、各地点での伝搬特性について検討を加える。振動エネルギーの伝搬特性やパワースペクトル密度関数の時間による変化、二乗平均応答と最大速度応答の関係等について解析する。特に最大速度応答と振動エネルギーの間の関係に基づいた最大速度応答の簡単な推定法について検討を加える。さらに速度応答のパワースペクトル密度関数を用いてシミュレーションにより得られた応答波から最大速度応答を求め、先に推定した提案式との比較を行い、その精度について検討する。

## 2. 解析法

### (1) 最大速度応答

発破によって生じる振動は高次振動成分が主要なものとなっている。これは地震波のように地盤全体の振動と異なり局所的な振動によるものであり高次振動成分が卓越するが、この振動は時間と共に低次の振動数側に変化する。また波動の伝搬に伴って複雑な地形や減衰の影響を受けて変化する。このような発破振動による応答特性

を把握し、最大速度応答を推測することは発破を行うに際して重要なものとなる。一般には発破を行う場合その周辺での岩盤や表層地盤の動的特性が未知の場合がある。この様なとき試験発破による波動の伝搬特性を把握し、最大速度応答の推測法について検討を加えておくことが必要になると考えられる。

一般に発破振動によって伝搬する波動は不規則な特性を有しており、非定常な振動として表される。すなわち、任意の地点における速度応答は

$$v(t) = g(t)z(t) \quad (1)$$

と表される。ここで $z(t)$ は定常な不規則関数であり、 $g(t)$ は時間によって変化する確定関数である。速度応答 $v(t)$ のフーリエ変換を行うとそれに関するパワースペクトル密度関数を求めることができる<sup>9)</sup>。すなわち時間 $t$ までのパワースペクトル密度関数は

$$S_v(\omega, t) = \frac{1}{t} \left( \int_0^t v(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right)^2 \quad (2)$$

と表される。この場合主要となる振動は短時間の内に伝搬するので、その振動エネルギーの変化について調べることとする。各観測点に伝搬する振動エネルギーはその点での速度の二乗に比例する。そこで速度の二乗の平均を求め、その平方根をここでは振動エネルギーと考えることにする。すなわち、

$$E(t) = \sqrt{\frac{1}{t_0} \int_0^t v^2(t) dt} \quad (3)$$

ここで $t_0$ は対象とする波動の継続時間である。ところで時間の経過に従って $S_v(\omega, t)$ は一定の値に近づくものと考えられる。一般に発破振動による振動エネルギーの伝搬は極めて短時間に集中するため、最大速度が生じた後は自由振動となる。この振動でのパワースペクトル密度関数 $S_v(\omega)$ を用いると、二乗平均応答は

$$\sigma_v^2 = \int_0^\infty S_v(\omega) d\omega \quad (4)$$

と表される。一般に二乗平均応答 $\sigma_v$ と最大速度応答 $v_{\max}$ の比はピーク係数として表される<sup>3),7)</sup>。すなわち、

$$p = v_{\max} / \sigma_v \quad (5)$$

定常振動の場合、ピーク係数は振動の継続時間と共に増加し、一定値に漸近する傾向が見られる。一方発破振動の場合、その応答は非定常性を有しており、また最大応答は初期の短時間に集中するため、ピーク係数の値もその影響を受けるものと思われる。波動の伝搬に伴って $E(t)$ は急激に増加し最大値 $E_{\max}$ に達する。この場合 $E_{\max}$ は二乗平均応答と関係があるため、この値は最大速度応答と何らかの関係があることが考えられる。すなわち、

$$E_{\max} = c_1 \sigma_v = \left( \frac{c_1}{p} \right) v_{\max} \quad (6)$$

ここで $c_1$ は係数であり、波動の伝搬特性、発破の方法、その強度等によって変化する。このため $E_{\max}$ と $v_{\max}$ の関係が明確になれば最大速度応答の推定が可能になるものと思われる。式(6)において $E_{\max}$ と $v_{\max}$ の比が波動の伝搬に関して一定の関係を有することが分かれば最大速度応答の推定が容易になると思われる。伝搬する振動エネルギーは爆薬量によって大きく変化するため、初めに爆薬量と振動エネルギーの関係を推定しておけば、式(6)の関係が発破点からの距離に関係なく適用できることになる。本解析では観測波を利用してこれらの関係について調べ最大速度応答の推定法について検討を加える。

## (2) シミュレーションによる最大速度応答の推定

一般に式(1)で示されるように発破振動によって伝搬される波動は非定常性を有している。また波動の主要部は短時間の内に伝搬し、その後自由振動として減衰する。式(2)で示されるように極めて短時間の内に最大に達した振動エネルギーに対するパワースペクトル密度関数に注目すると、定常振動としての扱いが可能になる。式(4)で表されるパワースペクトル密度関数を用いると、シミュレーションによって不規則な波動を求めることができる。すなわち不規則は $z(t)$ は

$$z(t) = \sigma_v \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{k=1}^N \sin(\omega_k t + \phi_k)} \quad (7)$$

と表される。ここで $\phi_k$ は一様乱数からなる位相角であり $0 \leq \phi_k \leq 2\pi$ となる。また $\omega_k$ はパワースペクトル密度関数 $S_v(\omega_k)$ の分布形に対応した確率密度を有する振動数である。試験発破によって得られたパワースペクトル密度関数が与えられると、式(7)により振動波がシミュレーションより求められる。このような波動はパワースペクトル密度関数の中にその伝搬特性にともなう地盤等の影響を含んでおり、式(7)で得られた振動は一つのサンプルとなる。そこで式(7)を用いて多数の応答波を作成し、その最大値を求めることにする。したがって、ここで得られた最大速度応答と観測から得られた結果との関係を調べることにより、式(6)等を用いて求めた最大速度応答の推定の妥当性が検討できることになる。

さらに発破振動によって伝搬される波動は非定常性を有するため、その特性を正確に把握するためには式(1)に示すように確定関数 $g(t)$ を求めることが必要になる。試験発破によって得られた波動の包絡線を用いることによって一つの非定常波を得ることができる。本解析では観測波を利用してこれらの関係について調べ最大速度応

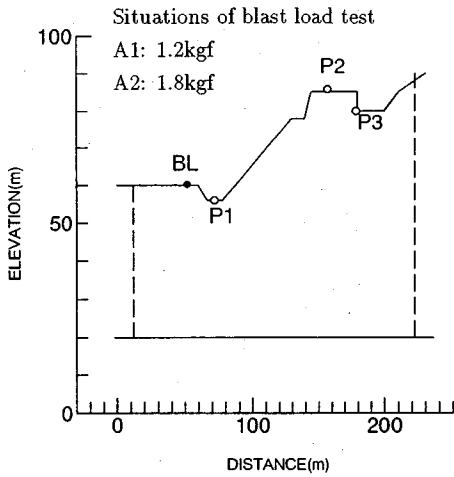


図-1 試験発破と観測点の位置

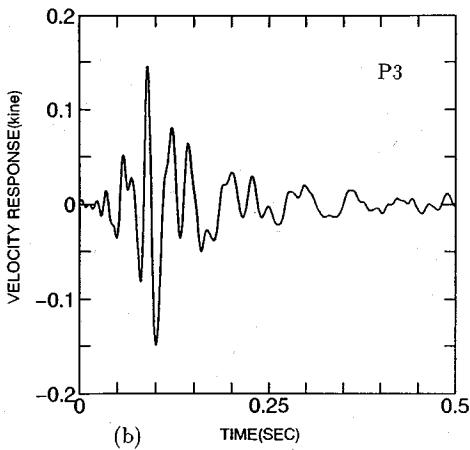
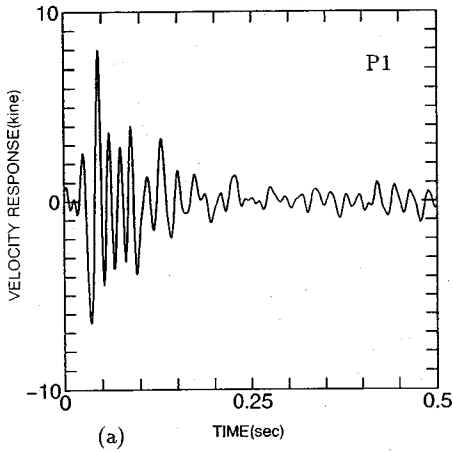


図-2 速度応答の時刻歴

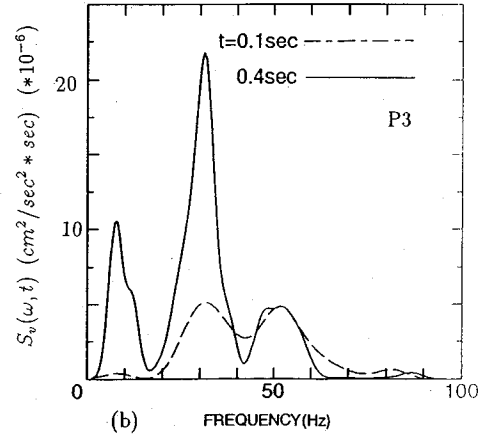
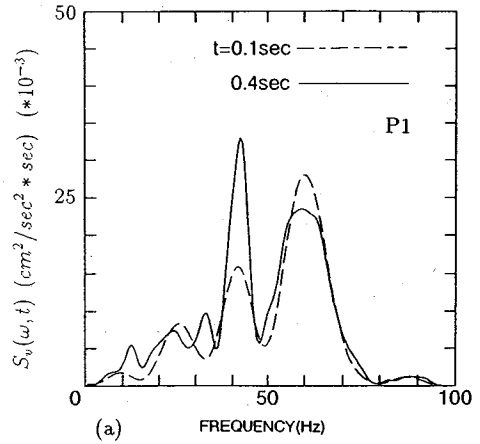


図-3 パワースペクトル密度関数

答の推定法について検討を加える。

### 3. 数値解析とその結果

#### (1) 観測波とその伝搬特性

図-1は試験発破の行われた地点の概略を示したものである。発破点は谷底に相当する地点にあり、観測点はそれぞれ図-1に示されるように発破点から約20m(P1)、90m(P2)、120m(P3)である。これらの地点を含む周辺の岩盤や表層地盤の動的特性は明らかでないが、波動の伝搬においては地形の影響が加わるものと思われる。ここでは試験発破による観測波としては盤打ちによる場合のみを扱っている。A1とA2の二つのケースについて行われた観測波について解析を行うことにする。発破に用いた火薬はいずれもANFOであり、A1では1.2kgf、A2では1.8kgfをそれぞれ2孔と3孔に分けて装填している。各観測点での振動は水平方向(y)と鉛直方向(z)の2成分の観測を行った。

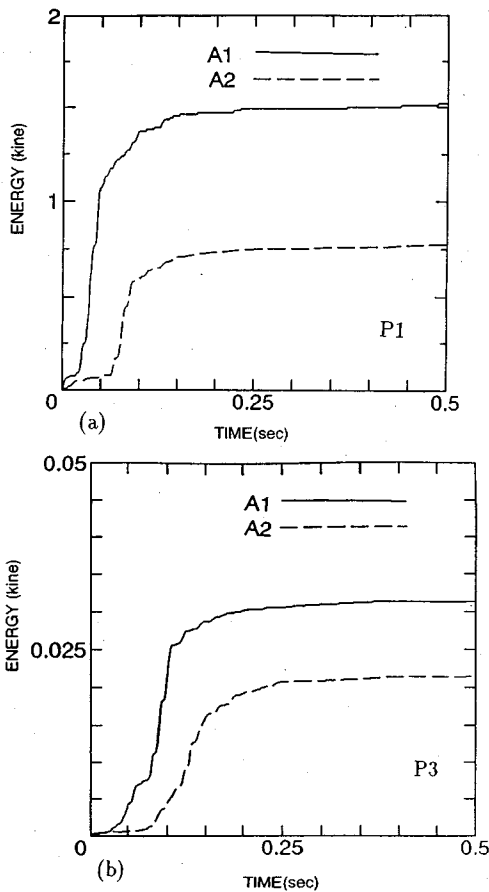


図-4 振動エネルギーの時刻歴

図-2 (a), (b) はそれぞれ A1 の場合の P1 点と P3 点での水平方向振動の速度応答の時刻歴を示したものである。これらの速度応答は最初の 0.5 秒までを示している。観測では約 2 秒までの応答が記録されているが、最大速度応答に注目した場合、最初の発破による振動が卓越しているため、本解析では最初の 0.5 秒のみを扱うことにする。P1 点での応答は高次振動が主要なものであるが、これは最初の 0.1 秒程度であり、その後は徐々に低次の振動へと変化してゆくことが分かる。一方、P3 点での応答は発破点から 120m 離れており、伝搬に伴う距離減衰や内部減衰の影響を受けて振幅は大きく減少する。このため主要動の振動数も P1 点に比べて低次の振動数に変化することが分かる。全体に発破振動による各点の振動は非定常な振動となっていることが分かる。

図-3 (a), (b) はそれぞれ P1 点と P3 点での速度応答によるパワースペクトル密度関数を示したものである。発破による振動は極めて短時間の内に主要振動が伝搬するため振動の継続時間によって、そのパワースペクトル密度関数が変化することが分かる。この結果は主要

動の振動が卓越する約 0.1 秒と自由振動になる 0.4 秒での値をそれぞれ示している。P1 点では主要動が到達するときは約 60Hz の振動数が卓越し、その後自由振動に移ると約 40Hz の振動数が主要なものとなることが分かる。一方、P3 点では主要動が到達するときは 30Hz から 50Hz の振動数が中心となるが、自由振動になると約 10 Hz と 30Hz 付近の振動が卓越する。このように波動の伝搬に伴って主要な振動数が異なっており分散性の特性を有していることが分かる。このため伝搬する波動のシミュレーションにおいては、パワースペクトル密度関数が時間に依存したものとなり、式 (7) で示した最大速度応答の予測では、主要動が到達した後の値を用いる必要があると考えられる。

図-4 (a), (b) はそれぞれ式 (3) に示すように P1 点と P3 点における速度応答に伴う振動エネルギーの変化を示したものである。発破点に近い P1 点における振動エネルギーは短時間の内に伝搬し、最大値に近い値となる。その後は自由振動として減衰し全体としての振動エネルギーの増加は微小なものとなる。一方、P3 点における主要な振動エネルギーは低振動数へと変化するため最大エネルギーに達する時間は P1 点に比べて少し緩やかである。同様に振動エネルギーは急速な増加の後には自由振動となるため、ほとんど増加しない。このように振動エネルギーの増加は急激であり、発破振動による最大速度応答を推定するためには主要動による最大振動エネルギーに注目することが必要になると思われる。

## (2) 振動エネルギーと最大速度応答

試験発破の結果を基に最大速度応答の予測を行うため、A1 と A2 のケースについて得られた波動の特性について検討を加える。図-5 (a), (b) はそれぞれの速度応答の二乗平均応答と伝搬距離の関係を示したものである。振動エネルギーは伝搬距離の 2 乗に逆比例するような形で伝搬すると考えられるが、観測点が 3 地点に限られるため各観測地点間の変化は分からない。そこで水平方向及び鉛直方向とも二乗平均応答と伝搬距離の対数をとり表示する事にする。観測点が少ないので各点の値を直線で結んでいる。これらの関係が一本の直線で表されれば波動の伝搬は簡単な関係で表されるが、地形等の影響を受けるため単独の直線だけでは表されないことが分かる。すなわち、P3 点に見られるように地形が変化する場合、その影響を反映して二乗平均応答と伝搬距離の対数は P1 点と P2 点の間に比べて大きく変化することが分かる。

図-6 は最大速度応答と二乗平均応答の比であるピーク係数をそれぞれの伝搬距離に対して示したものである。発破振動による波動は図-2 に示したように非定常な振動となるため、ピーク係数は一般に大きな値を示し

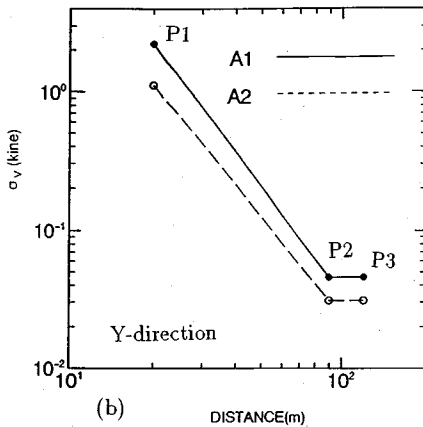
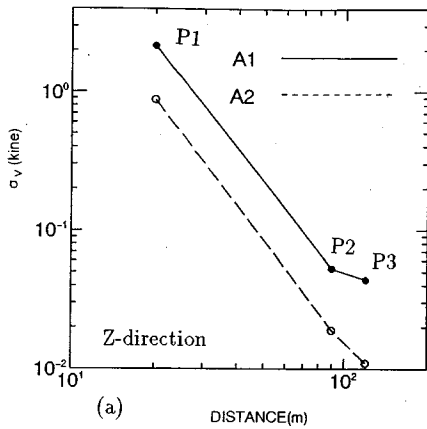


図-5 伝搬距離と二乗平均応答

ている。特に発破点に近い程、ピーク係数は大きな値を示しており、波動の伝搬に従ってこの値も全体として減少する傾向を示している。このような最大速度応答の変化は振動エネルギーや主要な振動数の変化によるものと考えられる。不規則な振動である速度応答のピーク係数が伝搬距離とともに変化することは、最大速度応答の予測に対して式(3)に示すように振動エネルギーの変化について考慮する必要があるものと思われる。そこで式(6)に示すように振動エネルギーの最大値と速度の二乗平均応答の関係を調べてみる。

図-7はA1とA2の各ケースにおける最大振動エネルギーと速度の二乗平均値との関係を示したものである。この値は伝搬距離によってほとんど変化せず、いずれの場合もほぼ一定の値を示していることが分かる。最大の振動エネルギーは主要動が伝搬した後は先に示したようにほぼ一定となる。またこのとき速度の二乗平均応答は主要動が到達した後では殆ど大きな変動を示さないため、最大振動エネルギーと二乗平均応答の比は伝搬距離に関わらず一定となるものと思われる。さらに、先述したように最大速度応答と二乗平均応答の関係を考慮す

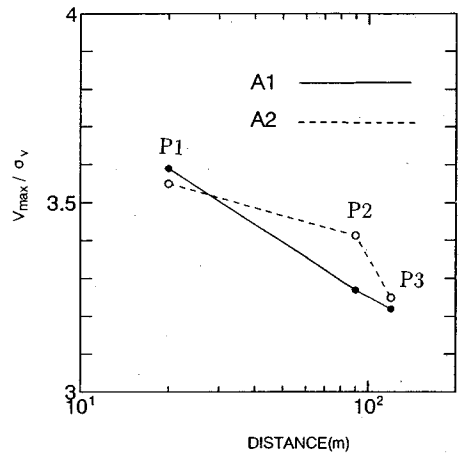


図-6 伝搬距離とピーク係数の関係

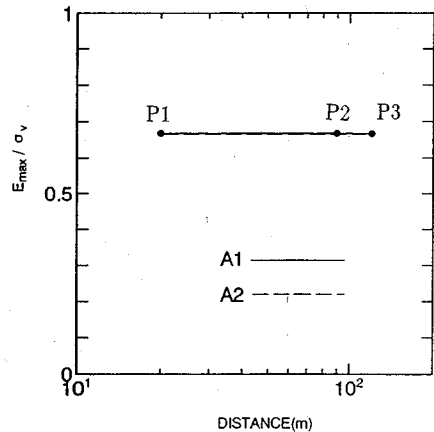


図-7 伝搬距離に対する最大振動エネルギーと二乗平均応答の比

ると、最大振動エネルギーと最大速度応答の間にも何らかの関係があるものと考えられる。

図-8は最大速度応答と最大振動エネルギーの関係を示したものである。横軸は最大振動エネルギーであり、○印はA1とA2の各ケースに対する結果を示している。実線は最小二乗法による回帰式の値であり、ほぼ一定の値を示している。発破の強度は観測点での最大振動エネルギーと関連づけることができると考えられるので、最大速度応答はこれらの関係を用いて推定することができる。波動の伝搬による複雑な地形の影響や減衰の変化は最大振動エネルギーの変化として表されられる。これらの結果からも分かるように式(3)の振動エネルギーは短時間の内に主要動が伝搬した後には一定値になる。このため試験発破により爆薬量による強度と観測点での振動エネルギーの関係を調べておけば、式(6)の関係を用いて最大速度応答の推定ができるものと思われる。さらに、これらの値の変動量を把握するこ

とができれば、より正確な最大速度応答の推定が可能になるものと思われる。

### (3) シミュレーションによる最大速度応答の推定

発破による振動は非定常性を有しており、極めて短時間の内に伝搬する主要動によって最大速度応答が生じる。このような非定常の波動の再現は難しいが、最大速度応答に最も大きな影響を及ぼす主要動に注目して定常振動として扱うと最大速度応答の推定は可能となると考えられる。先述したように発破振動による波動のパワースペクトル密度関数は主要動が到達した後は振動エネルギーは殆ど最大値に達した場合に相当する。したがってこのようなパワースペクトル密度関数を用いて速度応答波のシミュレーションを行うことにする。式(7)に示すように任意のパワースペクトル密度関数が与えられると独立に発生させた乱数を用いて波動のシミュレーションを行うことができる。そこで目標とする地点のパワースペクトル密度関数を図-3に示したような関数として与える。これより定常振動としての一つの時刻歴応答を得ることができる。そこでこのような応答波を多数回作成し各ケースの最大速度応答を求め、その平均値と分散を求める。図-9(a), (b)は100回のシミュレーションによる最大速度応答と伝搬距離の関係を示したものである。本解析モデルの場合、100回のシミュレーションを行うとこれらの最大応答の平均値とその標準偏差はほぼ一定の値になるため、そのサンプル数は100個にしている。実線は観測波によるものであり、点線はシミュレーションによって求めた最大速度応答の平均値である。また破線は最大速度応答とその標準偏差の和であり、一点鎖線は最大速度応答とその標準偏差の2倍との和をそれぞれ示している。観測点が3地点と少ないので、それぞれの結果は直線で結んでいるが、シミュレーションによる結果は観測値とよい対応を示している。観測値の最大速度応答には非定常性の影響も含まれるが、シミュレーションによる場合、平均値にその標準偏差を加えた結果が、観測値とよい対応を示している。また、発破の種類にかかわらず定常振動によるシミュレーションによる最大速度応答は観測値とよい対応を示している。すなわち振動エネルギーと関係のあるパワースペクトル密度関数を用いると、定常性という仮定のもとでも最大速度応答が評価できることが分かる。したがって式(6)で示した最大振動エネルギーを用いた最大速度応答の評価は、このような観点からも、その振動特性を反映したものとなっていることが分かる。

さらに、発破振動によって伝搬する波動の非定常性を考慮したシミュレーションにより速度応答を求めると図-10が得られる。この場合式(1)の確定関数 $g(t)$ は観測波に基づいて求めた。不規則関数 $z(t)$ や確定関数を用

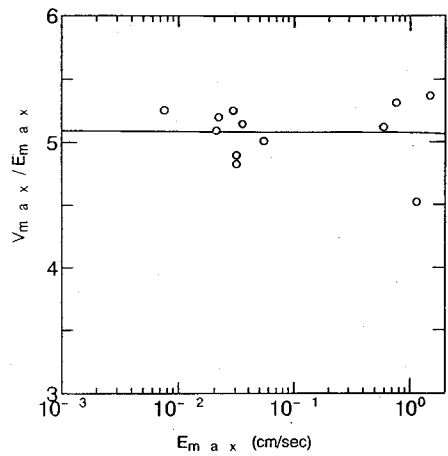


図-8 最大振動エネルギーと最大速度応答

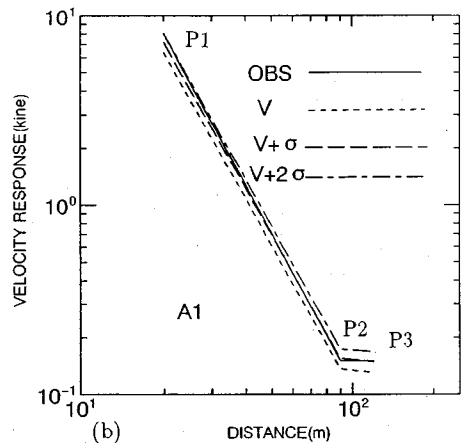
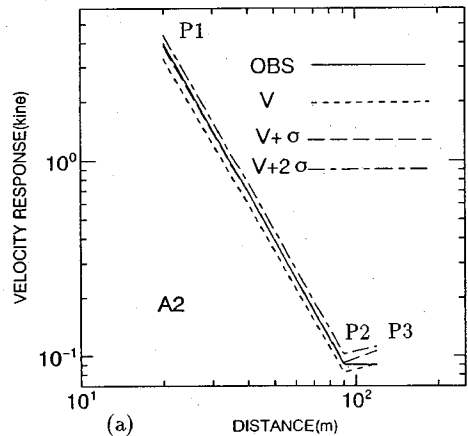


図-9 シミュレーションによる最大速度応答

いて式(7)と同様の方法でシミュレーションにより速度応答を求めると観測波との対応は得られるが、主要動の部分で位相のずれを生じている。この場合は非定常パワースペクトル密度関数を用いていないため、確定関数

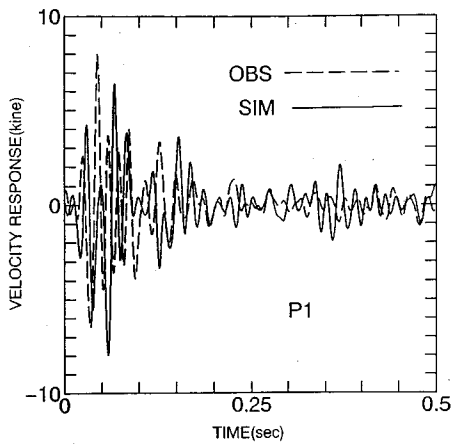


図-10 シミュレーションによる速度応答

$g(t)$ の値により応答値は大きく影響を受けることになる。しかしながら最大速度応答に注目する場合、前述したように定常の振動として扱うことによって、その値の推定は可能である。このため発破振動による最大速度応答の推定を行うためには、最大振動エネルギーとの関係を利用し、さらに定常性を考慮した波動のシミュレーションを用いればより正確な推定ができるものと考えられる。

#### 4. まとめ

発破振動において問題となる最大速度応答の推定法について検討を加えた。本解析で得られた結果を要約すると次のようになる。

1) 発破振動による波動は地形等の影響を受けて複雑な伝搬特性を示す。この波動は一般に不規則波として表さ

れ、最大速度応答はそれらの統計量である二乗平均応答、最大振動エネルギーと一定の関係がある。

2) 発破の種類やその地点の岩盤等の特性により応答特性は大きく変化するが、各地点での最大速度応答は最大振動エネルギーの関数となる。この場合最大速度応答の変動は比較的小さいので、最大振動エネルギーが与えられれば最大速度応答の推定が可能になるものと考えられる。

3) 発破による振動エネルギーは短時間の内に伝搬するため振動エネルギーも同様に最大値に近づく。主要動が伝搬した後のパワースペクトル密度関数を利用するとシミュレーションによって最大速度応答を推定することができる。パワースペクトル密度関数は岩盤や表層地盤の伝搬特性を反映するため試験発破の結果を用いることにより、その信頼度を向上させることができる。

#### 参考文献

- 1) 久武勝保, 桜井春輔, 伊藤富雄: 既設トンネルの振動挙動に及ぼす近接発破の影響, 土木学会論文報告集, 第332号, pp. 67-74, 1983.
- 2) 田村重四郎, 中村豊, 加藤勝行: 地中坑道に発振源がある場合の周辺地盤に震動の解析, 土木学会論文報告集, 第281号, pp. 41-53, 1979.
- 3) R. W. Clough and Penzien, J.: *Dynamics of structures*, Mc-Graw Hill Inter. Ed., pp. 87-169, 1975.
- 4) 平田篤夫, 金子勝比古: 掘進発破振動の最大振幅予測法に関する一考察, 資源・素材学会誌, 108, No. 5, pp. 389-395, 1992.
- 5) 平田篤夫, 石山宏二, 金子勝比古: 掘進発破振動のスペクトル特性, 資源・素材学会誌, 108, No. 5, pp. 199-205, 1992.
- 6) 大崎順彦: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, pp. 112-169, 1979.
- 7) C. Lomnitz and Rosenblueth, E.: *Seismic risk and engineering decisions*, Elsevier Scientific Pub. Comp., pp. 287-338, 1976.

(1993.12.24 受付)

## AN ESTIMATION OF MAXIMUM VELOCITY ON BLAST VIBRATIONS

Akihiko MIYAJI, Kenji KAWANO, Kohei FURUKAWA  
and Kouji NAKAGAWA

An estimation of maximum velocity responses, which are caused by blasting vibration, gives the important roles on performing and controlling the blasting work. The observation data of blast vibration, which propagate in the soil and rock, have random characteristics. In this study, evaluating the relation between the maximum vibration energy of the wave and the maximum velocity response, it is shown that the maximum velocity can be estimated with a simple relation.