

$F(\omega)$ を、震源の特性を示す震源スペクトル $S(\omega)$ と、震源から観測地点までの波動伝播特性を示す $D(\omega)$ 、及び観測点周囲の局所的な地盤構造特性を示す $A(\omega)$ の積として(1)式のように表現する。

$$F(\omega) = S(\omega) D(\omega) A(\omega) \quad (1)$$

本研究では、上記の予測方法を基に、震源スペクトル $S(\omega)$ の推定に対して、ベンチ発破の諸条件(発破対象岩盤の岩質、発破規模、使用爆薬の種類、装填方法の違い)の変化が反映されるように改良を加えた。なお、 $D(\omega)$ については平田等の考え方を採用した。また、 $A(\omega)$ は、今回の検討には加えなかった。以下に、予測方法について概要を説明する。

2.1 震源スペクトル

震源スペクトル $S(\omega)$ は、無限媒体中に存在する半径 a の有限球状空洞の内壁上に $\tau < 0$ (sec)で $P(\tau) = 0$ 、 $\tau \geq 0$ (sec)で $P(\tau) = P_0$ となるステップ関数の性状を持つ内圧が作用する球状震源と仮定し、(2)式にて表現している。なお a は発破による引張破壊圏の半径、 P_0 は無限媒体すなわち岩盤の引張強度である。また、 ω は角振動数、 ρ は岩盤の密度、 Vp は岩盤の縦波弾性波速度、 Vs は岩盤の横波弾性波速度、 ω_0 は卓越角振動数を示す。

$$S(\omega) = \frac{P_0 \omega / \rho Vp}{\sqrt{(4Vs^2/a^2 - \omega^2)^2 + (4Vs^2\omega/aVp)^2}} \quad (2)$$

$$\omega_0 = \frac{2Vs}{a}$$

本論文では、震源スペクトルに与える発破諸元の影響を考察することを目的としているので、発破に伴う引張破壊圏半径を発破諸元と関連づける必要がある。そこで、岩質、爆薬の種類、装填方法等の考慮された発破設計手法を用いて関連づけを行った。

Persson⁴⁾らは、Langeforsらの提案した標準的発破設計手法を改良し(3)式に示す設計式を提案している。

$$B = \frac{d}{2} \left[\frac{P_b \pi S_b}{1.11 f \hat{c}} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$S_b = \frac{5}{6} \frac{Qv}{Qv_0} + \frac{1}{6} \frac{V}{V_0} \quad (4)$$

$$f = \frac{3}{3+n} \quad (5)$$

$$\hat{c} = c + 0.05 \quad (6)$$

ただし、 B は最小抵抗線、 d は爆薬径、 P_b は爆薬の比重、 S_b はLFB Dynamiteを基準とするウェイトストレンクスで、(4)式より計算される。LFB Dyna-

miteとは、Nitro Nobel社の膠質ダイナマイトで、ニトログリセリンの含有量が約35%、爆速が約6,100 m/sの製品である⁵⁾。なお、 Qv_0 、 V_0 はLFB Dynamite 1 kg当りの比エネルギーと比容で、 $Qv_0 = 5$ MJ、 $V_0 = 850$ literである。拘束係数 f は、(5)式より計算されるもので、 n はベンチの傾きを1 m高さ当たりの水平距離で示したものである。 \hat{c} は発破係数 c を(6)式に従って補正したものである。

Kasahara⁶⁾によれば、大規模一自由面発破における、見かけ震源半径 a と岩盤の破砕体積 Vf の間にはおおよそ $a \propto Vf$ なる関係が成立することを明らかにしている。ここでベンチ発破の場合には各発破諸元における破砕体積は標準的な発破設計手法より算出することができる。したがって、ベンチ発破に伴う一孔当たりの見かけ震源半径すなわち引張破壊圏半径 a は、この破砕体積と等価な体積を有する球体の半径 a' に比例すると考えることができる。ここで、(3)~(6)式より岩質、装薬形態毎の標準的な最小抵抗線 B を算出し、これに孔間隔 L とベンチ高さ H を掛け合わせると、ベンチ発破での一装薬孔当たりの破砕体積が算出される。したがって、比例定数を k とおくと次式が成り立つ。

$$a = ka' = k^2 \sqrt{\frac{3BHL}{4\pi}} \quad (7)$$

比例定数 k の値はオーダー的には1に近い値であると予想されるが、その値の確定には、実験的検討が必要である(なお、 k の値の推定法に関しては後述する)。また、発破振動制御の観点から、発破形態は一孔一段による段発破のみを想定した。

2.2 波動伝達スペクトル

震源から観測地点までの波動伝播特性を示す $D(\omega)$ は、発破点から観測点直下まで均質な地盤中を伝播するのみと仮定すれば、(8)式に示すように、距離による減衰と岩盤の粘性的な性質による減衰で単純に表現できる。

$$D(r, \omega) = \frac{\exp\left(\frac{-\omega r}{2VpQ}\right)}{r^n} \quad (8)$$

ここで、 r は波動伝播距離、 n は、幾何学的距離拡散指数で、3次元無限媒体内の実体波(P波、S波)の場合は1、半無限媒体内の実体波の場合は2、表面波の場合には1/2を示す。本考察の対象は主にベンチ発破などの明かり発破であり、 n としては半無限媒体での値を採用することになる。しかしながら、考察の主眼は伝播距離の変化による周波数毎のスペクトル変化

Table 1 Characteristics of rock, blasting design and Explosives

Quality of rock	Hard	Medium hard	Soft
Powder factor (kg/m ³)	0.4	0.3	0.2
Young's modulus (GPa)	49	30	25
Poisson's ratio	0.25	0.25	0.25
Density (kg/m ³)	2600	2600	2600
Compressive strength (MPa)	160	80	50
Tensile strength (MPa)	11	6	3
Q index	25	15	10
Scale of blasting	Small	Average	Large
Hole diameter (mm ϕ)	65	100	165
Bench height (m)	5	10	15
Type of explosive	Dynamite	Water gel	ANFO
Explosive diameter (mm ϕ)	50	50	65, 100, 165
Explosive density (kg/m ³)	1300	1200	850
Weight strength	0.94	0.89	0.84

の検討であり、(8)式の通り、幾何学的距離拡散指数はスペクトルの振幅絶対値には大きく影響するが、スペクトル形状には影響を与えないと判断できるため、 n は定数として取り扱い、距離の変化に伴うスペクトルの検討は各距離ごとに最大値で正規化したものでその変化度合いを考察対象とした。 Q は岩盤の非弾性的(粘性的)な性質による波動減衰を表す指標(Quality Factor)である。

3. 発破諸元の震源スペクトル変化への影響

2.1に示した考え方に基づき、発破諸元の変化が震源スペクトルの変化に与える影響についてモデル計算を実施した。なお、以下では、スペクトルの相対的变化を検討するために、 $k=1$ として計算を行っている。またベンチの幾何形状に関しては、孔間隔は最小抵抗線の1.25倍、ベンチ高さは、最小抵抗線の約2.5倍とした。発破諸元で変化させたパラメータをTable 1に示す。岩質は硬岩、中硬岩、軟岩の3種類を想定し、発破係数の違いによって表現した。発破規模は装薬径とベンチ高さをを用いて表現し、3条件を設定した。爆薬はダイナマイト、含水爆薬、ANFOの3条件としたが、ベンチ発破では、ANFOが現在の主流であり、ダイナマイトと含水爆薬が100mm ϕ 以上の発破規模で全面的に使用されることはほとんどないため、小規模の発破のみに適用した。

3.1 爆薬の変化が震源スペクトルへ与える影響

爆薬の変更が予想される小規模のベンチ発破をモデルとして、ダイナマイト、含水爆薬、ANFOを用いた場合の硬岩、中硬岩、軟岩における震源スペクトルへ

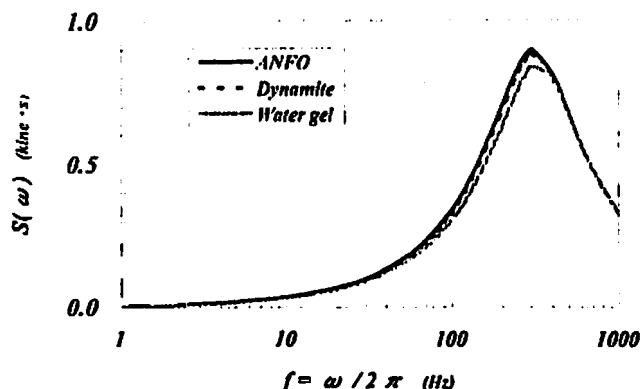


Fig. 1 Examples of source spectrum for various type of explosives in case of medium hard rock

の影響を考察した。

中硬岩における震源スペクトル算出例をFig. 1に示す。(2)式より、同一の岩質で震源スペクトルの特性を決定するのは引張破壊圏半径である。そこで、岩質、爆薬種類と引張破壊圏半径及び震源スペクトルの卓越周波数の関係をFig. 2にまとめた。

これより、爆薬の変化に伴う震源スペクトルへの影響は、同一の岩質であれば大きな差がないことがわかる。すなわち、爆薬の差異によって生じる引張破壊圏半径の差異はそれほど大きなものではなく、含水爆薬の破碎体積を1とすれば、ダイナマイトが1.15、ANFOが1.2程度である。この要因は、ダイナマイトや含水爆薬等の高威力爆薬の場合にはカートリッジ状の薬包を用いるために威力が弱められ、低威力ながら

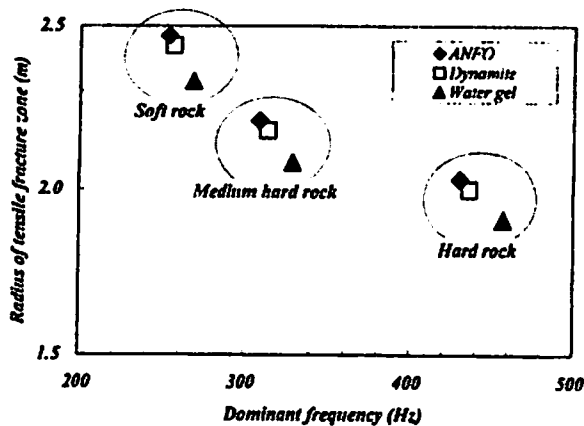


Fig. 2 Relationship between type of explosive and source spectrum

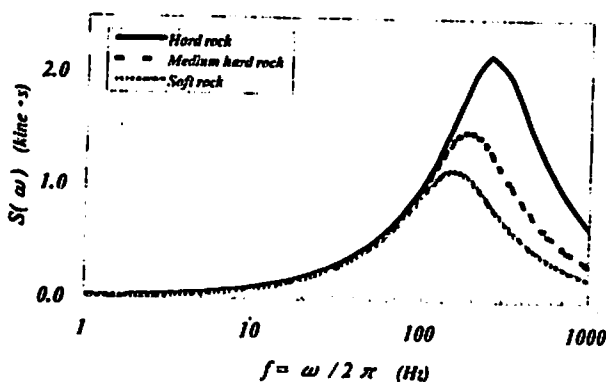


Fig. 3 Examples of source spectrum for various rock qualities in case of average scale blasting

密装填が可能なANFOに比較して破壊効果はほぼ同等となることが考えられる。また、実際の作業上も爆薬の種類変更によって発破規模すなわち抵抗線、孔間隔を大きく変更することは通常見られないことから、装薬孔径、ベンチ高さが一定でほぼ同一の破碎領域を目的として発破が実施される場合には、爆薬種の変更は震源スペクトルに影響を与えないと考えて良いものと推定できる。

これに対し、発破地点の岩質の変化による震源スペクトルの差異は爆薬の種類による差異よりも大きく、最も低い卓越周波数を示した軟岩のグループと最も高い卓越周波数を示した硬岩のグループでは約2倍の差が見られる。岩質の違いすなわち強度の差異が引張破壊圏半径に大きな差異を与えることは容易に理解できることである。本点については、岩質以上に引張破壊圏半径に大きな影響を与えると推定される発破規模と併せて事項にて検討する。

3.2 岩質、発破規模の変化が震源スペクトルへ与える影響

爆薬の種類をANFOに限定し、硬岩、中硬岩、軟

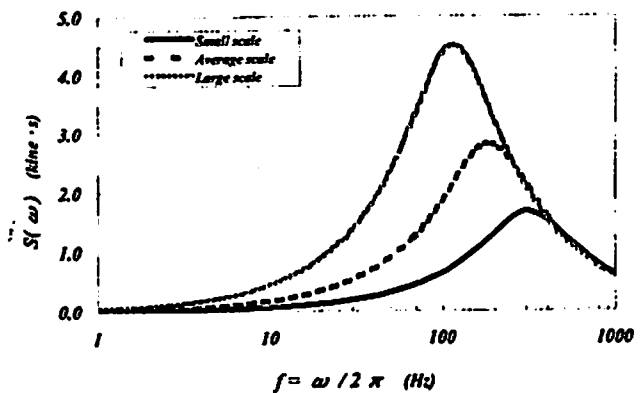


Fig. 4 Examples of source spectrum for various scale of blasting in case of medium hard rock

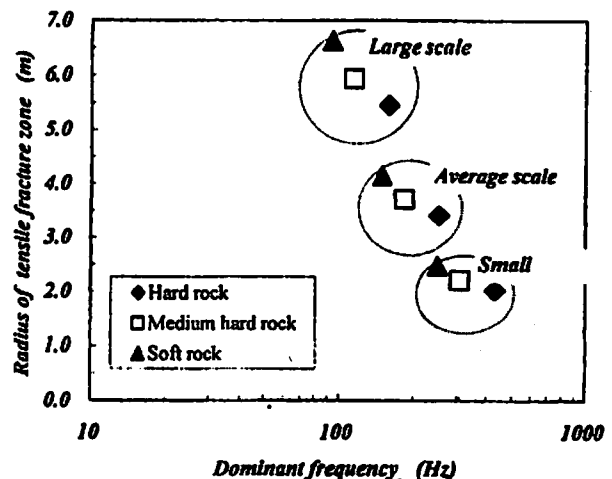


Fig. 5 Relationship between scale of blasting and source spectrum

岩の岩質の変化による震源スペクトルへの影響および小規模、中規模、大規模の発破規模の変化に伴う震源スペクトルへの影響を求めた。中規模発破における発破対象岩盤の岩質変化に伴う震源スペクトルの変化例をFig. 3、発破対象岩盤を中硬岩とし、発破規模の変化に伴う震源スペクトルの変化例をFig. 4に示す。また、発破対象岩盤の岩質、発破規模と引張破壊圏半径及び震源スペクトルの卓越周波数の関係をまとめたものをFig. 5に示す。

発破対象岩盤の岩質と震源スペクトルの関係は、硬岩ほど震源スペクトルの卓越周波数が高く、軟岩ほど卓越周波数が低い。これは当然のことながら、硬岩ほど岩盤強度が大きいため、それによって引張破壊圏の大きさも小さくなることによる。また、Fig. 3に見られるように、硬岩ほどスペクトルの振幅も大きい。さらに、発破対象岩盤の岩質変化に伴う振幅スペクトルの差異は卓越周波数より高い周波数範囲で大きくなっており、低い周波数範囲では殆ど振幅に差が見られな

い特徴を示す。すなわち、岩質の変化は、比較的高い周波数側で大きな変化を示す傾向がある。次に、発破規模毎に発破対象岩盤の岩質に伴う変化度合いを見てみると、絶対値としては、高い卓越周波数をもつ小規模発破の変化が大きく、規模が大きな発破になるほど変化は小さい。しかしながら、変化の割合はほぼ一定であり、何れの発破規模においても、硬岩の破碎体積を1とすれば、中硬岩で1.3、軟岩で1.8である。相対的に高い卓越周波数を示す小規模発破での変化が大きくなったといえる。従って、発破対象岩盤の岩質の変化に伴う震源スペクトルへの影響は、小規模な発破ほど大きいものと考えられる。

続いて、発破規模に関してであるが、今回の解析に用いたモデルでは発破対象岩盤の岩質の変化に伴うものよりも大きな変化を示している。また、Fig. 4に見られるように、大規模な発破ほどスペクトルの振幅も大きい。さらに、発破規模毎の変化に伴う振幅スペクトルの差異は、卓越周波数より低い周波数側で大きくなっており、卓越周波数より高い側では差が小さい。これは、前述した発破対象岩盤の岩質変化に伴う差異とは正反対の傾向であり、発破の規模は、低い周波数範囲で大きな変化を示す傾向がある。

(2)式から明らかなように、卓越周波数は引張破壊圏半径に反比例しており、岩質の違いによって変化した引張破壊圏半径よりも、モデルとして設定した発破規模の変化の方が大きかったためといえる。ちなみに発破規模は、小規模発破の破碎体積を1とすれば、中規模発破が約5、大規模発破が約20である。発破対象岩盤の岩質での変化に比べれば遙かに大きな変化割合である。しかしながら今回採用した発破規模のモデルはせん孔径の変化に従って一般的に採用されているものである。すなわち、震源スペクトルの変化に対して最も大きな要因は、発破規模の変更であると考えられる。

4. 伝播減衰に伴う振幅スペクトルの変化

発破点で発生した波動が、観測点直下まで均質な地盤中を伝播するのみと仮定し、発破諸元の変化に伴って変化した震源スペクトルが伝播過程でさらにどのような変化をするかについて検討をおこなった。

4.1 伝播媒体岩質毎の伝播減衰特性

Table 1に示した特性を持つ3種類の岩盤(硬岩: Q値25, 中硬岩: Q値15, 軟岩: Q値10)における距離毎の伝播減衰特性をFig. 6からFig. 8に示す。

何れの岩盤においても、距離の増大とともに高い周波数成分が大きく減衰することがわかる。また、その傾向は、軟岩すなわちQ値が小さいほど強くなる。例として、軟岩での25m伝播による減衰特性は、中硬岩

では50m、硬岩では100m伝播による減衰とほぼ同じ特性を示している。3.での検討から明らかなように、発破諸元の変化によって大きな変化を見せる震源スペクトルの範囲は比較的高い周波数部分であり、硬岩ほどその変化を忠実に遠方へ伝えられると考えられる。

4.2 発破諸元の変化と伝播減衰後における振幅スペクトルへの影響

4.1に示した伝播減衰特性と3.で検討した発破諸元毎の震源スペクトルの積を求め、発破諸元の変化による震源スペクトル変化が伝播減衰によってさらにどのような変化をするのかについて検討を行った。中硬岩における中規模発破の距離毎の振幅スペクトルを算出した結果例をFig. 9に示す。なお、各距離毎の振幅スペクトルは各距離毎の振幅最大値で正規化している。

まず、爆薬種類の変化と伝播減衰に伴う代表的距離における卓越周波数の変化をFig. 10に示す。なお、発破対象岩盤及び伝播媒体としては、震源スペクトル変化を最も忠実に伝える媒体、すなわち最も広範囲に変化を与える硬岩を選定した。

3.にて検討したとおり、爆薬種類の変化による震源スペクトルへの影響はほとんど見られないため、伝播減衰の過程でも各距離における振幅スペクトルもほぼ同一となる。

続いて震源スペクトルにおける変化が大きく予想される発破対象岩質の変化及び発破規模の変化と伝播減衰後の任意の距離における振幅スペクトルの変化を検討した。伝播媒体は、平均的なものとして中硬岩を選定した。発破規模を中規模とし、発破対象岩盤の変化と伝播減衰後の振幅スペクトル変化に関する試算結果をFig. 11に示す。また、発破対象岩盤を中硬岩とし、発破規模の変化と伝播減衰後の振幅スペクトル変化に関する試算結果をFig. 12に示す。

まず、発破対象岩盤変化の伝播減衰後の振幅スペクトルに対する影響を考察する。震源スペクトルでの卓越周波数は、硬岩が256 Hz、軟岩が150 Hzで約100 Hzの大きな差が見られるが、伝播に伴う減衰伝播特性の影響で高い周波数成分が大幅に減衰し、200 mを越えたあたりからその差異が見られなくなる。すなわち、震源での変化が伝播過程で吸収され、伝播地点の振幅スペクトルに影響が現れなくなる。

続いて、発破規模の伝播減衰後の振幅スペクトルに対する影響を考察する。震源スペクトルでの卓越周波数は、小規模発破が309 Hz、大規模発破が115 Hzで約200 Hzの発破対象岩盤の差異によるもの以上に大きな差が見られる。しかしながら、伝播に伴う減衰特性の影響で、やはり高い周波数成分が大幅に減衰する現象は同一であり、本ケースにおいても300 m近辺から

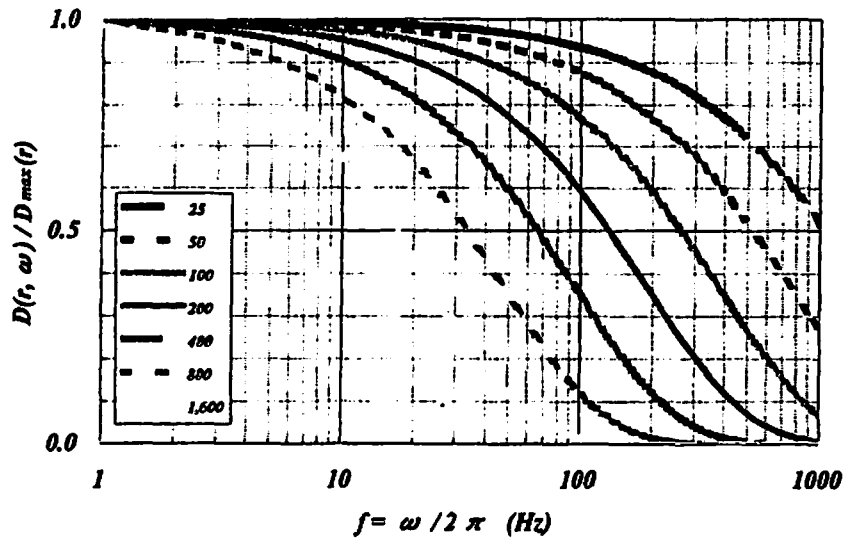


Fig.6 Examples of transmission attenuation spectrum in case of hard rock

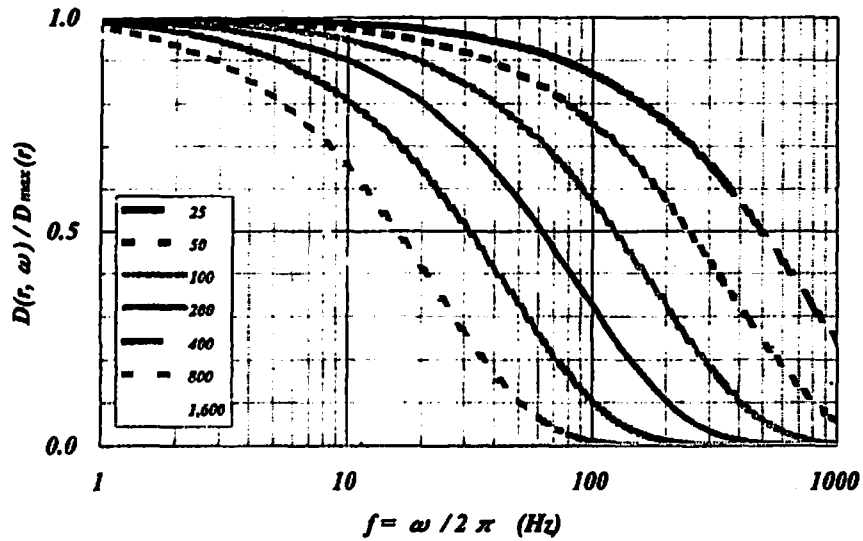


Fig.7 Examples of transmission attenuation spectrum in case of medium hard rock

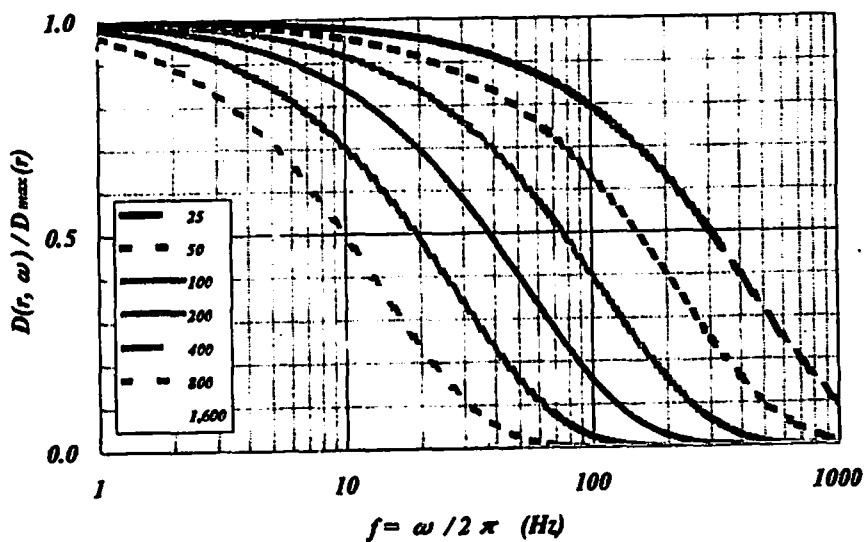


Fig.8 Examples of transmission attenuation spectrum in case of soft rock

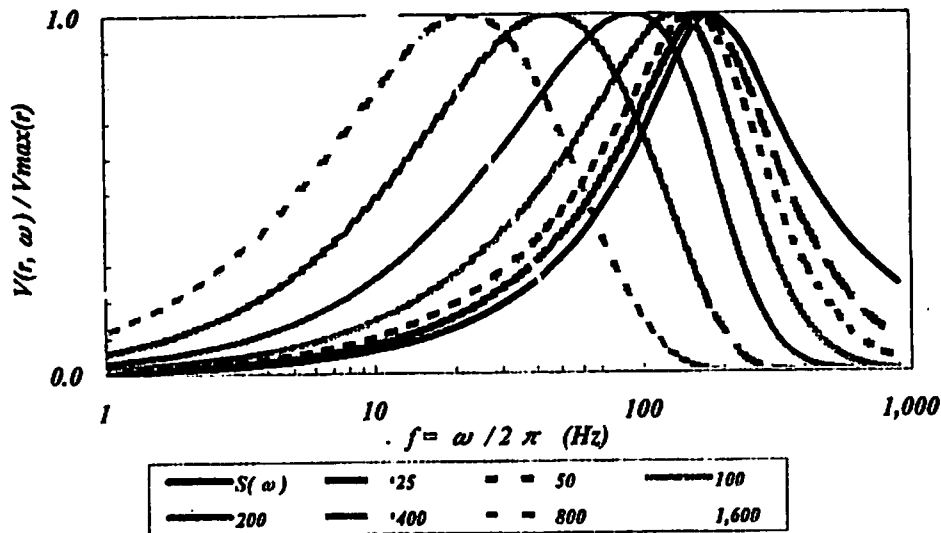


Fig. 9 Examples of vibration spectrum in various distances (medium hard rock and average scale blasting)

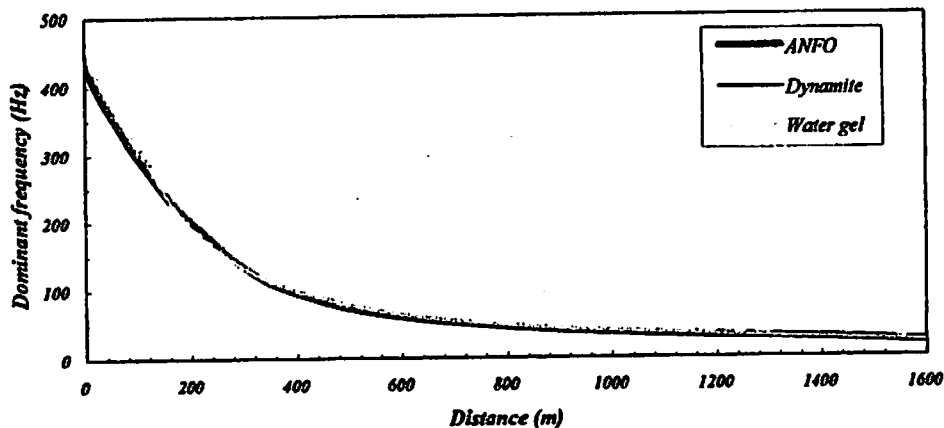


Fig. 10 Relationship between propagation distance and dominant frequency of vibration spectrum for various type of explosive (small scale blasting and hard rock)

震源に見られた差異が認められなくなる。

但し、上記何れのケースも卓越周波数に関しては差異が見られなくなるが、振幅については別途検討が必要である。

5. 干渉最適秒時設計に対する考慮点

以上の検討に基づき、秒時設計に関する考察を行った。

まず、震源スペクトルに対する種々発破条件の影響であるが、爆薬種類の変化はさほど大きな変化を震源スペクトルに対して与えないと考えることができる。これに比較して発破対象岩盤の変化と発破規模の変化は、震源スペクトルの卓越周波数に対して大きな変化を引き起こすことが推定された。しかしながら、これらの震源でのスペクトル変化は、伝播に伴う高い周波数成分の減衰のために距離の増大に従って消去され、ここで示した計算条件下では200から300 m離れる

と、その地点での波形、すなわち振幅スペクトルを決定しているのは伝播減衰特性のみであり、震源での変化の影響はほとんど無くなることが明らかとなった。今回の検討からは除外したが、さらに局所的地盤特性が存在すれば、震源の影響はより一層短い伝播距離の過程で無くなるものと推定される。従って、最適秒時設計の基となる単発波形は、最適干渉を行いたい地点で実測を行う必要があるものと結論される。また、その設計値は、測定地点の局所的地盤特性と、発破地点(震源)からの伝播減衰特性によって支配的に決定されるものと考えられ、震源での種々の変化はある程度無視できるものと考えられる。

波動干渉を利用した発破振動制御においては、通常は、まず、最適干渉を行いたい地点において単発波形の測定が実施される。そして、この単発波形の卓越周波数から最適秒時が決定される。ここで、最適干渉を

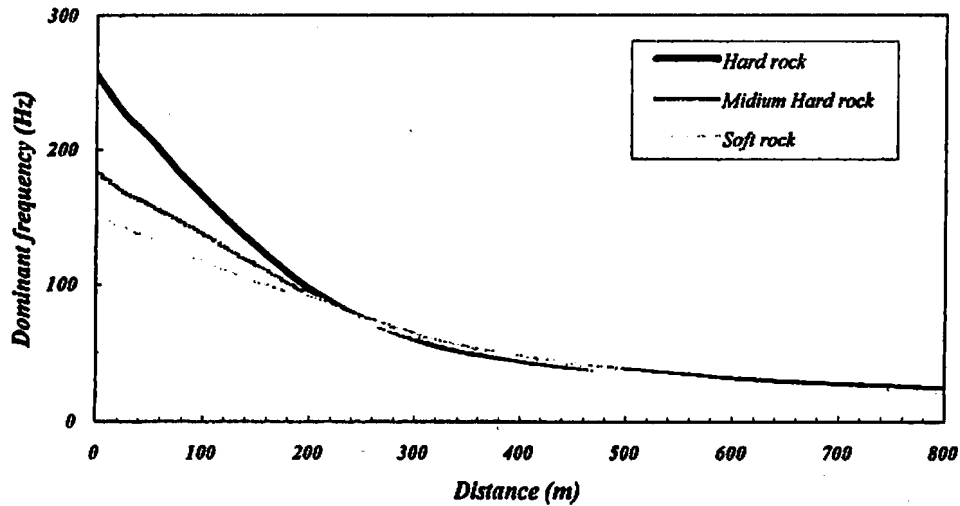


Fig. 11 Relationship between propagation distance and dominant frequency of vibration spectrum for various rock quality (average scale blasting and medium hard rock)

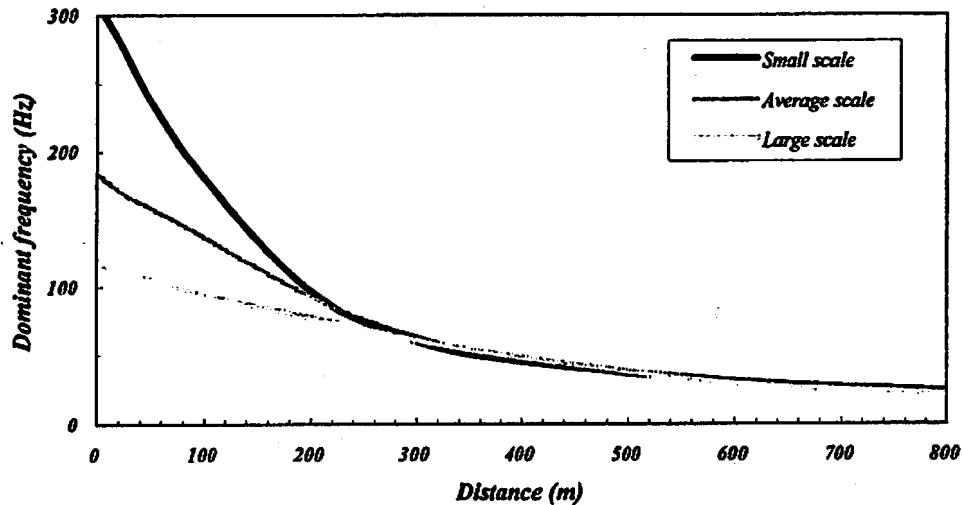


Fig. 12 Relationship between propagation distance and dominant frequency of vibration spectrum for various scale of blasting (medium hard rock)

行いたい地点が発破源から数百m以上遠方にある場合には、その後の発破条件や設計値が変化しても、単発波形の卓越周波数はさほど変化しないことから、最初に設定した最適秒時を継続して用いることができる。しかし、最適干渉を行いたい地点が数百m以内に存在する場合には、その後の発破条件・設計値の変化により単発波形の卓越周波数が大きく変化するため、条件が変化した毎に、単発波形の実測もしくは予測を行う必要がある。特に、ここで提案したモデルを用いると、最初に測定した単発波形の卓越周波数から引張破壊件半径 a を逆算し、これを(2)式に代入して比例定数 k を求めておけば、その後の発破条件の変化に伴う単発波形の卓越周波数変化を簡単に予測することが可能となる。したがって、この予測に基づいて最適秒時

設計を行うことができる。

なお、現在までの実績では、最適干渉地点と発破源との距離は数百m程度あるいはそれ以上である場合がほとんどであるが、今後はより近距離の条件が出現する可能性も高いと考えられるため、その場合には上記の点を留意すべきであると思われる。

6. 結 言

波動干渉を安定的になし得る起爆秒時設計手法の確立のため、秒時設計において最も重要な単発波形の発破条件変化に伴う震源特性への影響とその影響の伝播過程での変化について周波数領域での震源スペクトル及び伝播減衰スペクトル推定方法を用いて理論的検討を行った。また、秒時設計を行う上で考慮すべき点についての考察も実施した。

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 同一発破規模、同一岩盤での発破において、爆薬種類の変更はあまり大きな変化を震源スペクトルに対して与えるものではなさそうである。
- (2) 発破対象岩盤の変化(硬軟)と発破規模の変化(大小)は震源スペクトルの卓越周波数に対して100Hz超の大きな変化を引き起こす可能性がある。しかし、これらの震源でのスペクトル変化は、伝播に伴う高い周波数成分の減衰特性のために距離の増大に従って消去され、200から300m離れると消失する傾向が見られる。
- (3) 発破地点より遠点(約300m以上)での波形すなわち振幅スペクトルを決定しているのは伝播減衰特性が支配的であり、さらに局所的な地盤特性が存在すれば、いっそう震源の影響は短い伝播距離の過程で無くなるものと推定される。
- (4) 最適秒時設計の基となる単発波形は、最適干渉を実施する地点で予測あるいは実測を行う必要があるものと推定される。また、その設計値は、測定地点の局所的な地盤特性と、発破地点(震源)からの伝播減衰特性によって支配的に決定されるものと考えられ、震源での種々の変化はある程度無視できるものと考えられる。但し、最適干渉を実施すべき場所に近接した発破が繰り返し行われる場合にはさらなる検討が必要である。
- (5) 今回の考察では、ベンチ発破に伴う引張破壊圏半径と発破設計より導き出された破砕体積が比例関

係にあり、その比例定数を1と仮定している。また、幾何学的伝播減衰指数も距離に関わらず一定としており、これらの値については今後の検討課題としたい。また、今回は単発波形の変化予測にとどまったが、検討結果次第では単発波形の予測も可能になるものと考えられる。

文 献

- 1) 山本雅昭・市川清：EDDによる発破振動・音の予測と軽減、工業火薬協会誌、Vol. 49, No. 6, pp. 367~374(1988)
- 2) Hirata, A., Kaneko, K. and Ohmi, M. : Blasting vibration in jointed rock, Proceedings of International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Vienna, pp.763~770(1990)
- 3) 国松他：SH波重複反射法による地層構造を考慮した発破振動の予測手法、資源と素材、Vol. 113, No. 2, pp. 95~pp. 99(1997)
- 4) Persson, P., Holmberg, R., Lee, J. : Rock blasting and explosives engineering, CRC Press, pp.183~201(1993)
- 5) 木村真：工業火薬辞典 限定版、白亜書房、pp.55(1978)
- 6) Kasahara, K.: The nature of seismic origins as inferred from seismological and geodetic observations (1), Bull. Earthq. Res. Inst., Vol.35, pp.473~532(1957)



Theoretical study on blast vibration control method, which is based upon wave interference (Ⅰ)

by Masaaki YAMAMOTO*, Hidehiro NODA* and Katsuhiko KANEKO**

When we try to reduce blast vibration level by dint of wave interference method which use a pilot shot wave as a parameter to design optimum interval for interference of waves, we have to exam the reproduction accuracy of pilot shot wave. In this paper, we studied the reproduction accuracy of pilot shot wave by dint of theoretical method. Type of explosive, scale of blasting, quality of rock and wave propagation characteristics of rock were considered as factors which would effect the shape of pilot shot wave. Prediction method for an amplitude spectrum of blast vibration in tunneling which Hirata proposes was modified to predict an amplitude spectrum of blast vibration in bench blasting. Major modification was introduction of the design method for bench blasting proposed by Persson.

Results were summarized as follows:

- (1) Type of explosive does not effect strongly to the change of source spectrum when these blasts are done intended to achieve same excavation volume.
- (2) Scale of blasting and quality of rock play important role to the change of source spectrum and there is every possibility of changing over 100 Hz in dominant frequency of source spectrum.
- (3) Changes in source spectrum are absorbed gradually as the wave propagate and the differences in source spectrum are almost vanished after propagate more than 200 or 300 m.

(*Explosives R&D Center, Asahi Chemical Industry Co., Ltd., 2-1, Kinshi 3-chome, Sumida-ku, Tokyo, 130-6591, JAPAN

**Division of Environment and Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Nishi8-chome, Kita13-jyo, Kita-ku, Sapporo-city, Hokkaido, 060-8628 JAPAN)