

(20) 発破による低周波音の影響とその
軽減のための時系列調整について

INFLUENCE OF LOW FREQUENCY NOISE CAUSED BY BLASTING
AND CONCERNING TO DELAY CONTROL FOR BLAST SOUND COUNTERMEASURE

内田 季延* 小原 弘之* 塩田 正純*
Hidenobu UCHIDA Hiroyuki OBARA Masazumi SHIODA

井清 武弘** 国松 直** ラオ・キム・リャン***
Takehiro ISEI Sunao KUNIMATSU Lao Kim LEANG

ABSTRACT; Concerning to the blasting explosion making use of the case of construct the tunnel, the dumm. the neighbourhood makes complaint many different opinion about low frequency noise including audio frequency area. It is known that these complaint occurs particularly depending on rattling of the fixtures or the rattling of a certain window glass into the house. On account of control or countermeasure low frequency noise caused by these rattling, We had reported to the result of M-sequence blasting explosion system on tunnel in Environmental System Research Vol.18 1990. This paper shows the result of field measurement on bench cut making use of Ordinaly blasting and M-sequence blasting.

KEY WORDS; Maximum period null sequence, Blast sound, Impulsive noise, Low frequency noise

1. はじめに

発破による掘削作業を伴うダム、トンネルなどの土木工事現場や採石場では、発破作業に伴って発生する騒音、振動、低周波音の近隣への影響が懸念されている。近年、都市周辺における発破を伴う土木工事の増加や採石場近辺への住宅地の進出などの社会的要因により、発破工事に伴う近隣に対する環境保全の重要性は、ますます高まってきたものと考えられる。

発破に伴う発生音は、音源近傍では広い周波数成分を持つ高音圧レベルの衝撃音であり、遠方へ伝搬するにつれ高周波成分は減衰し低周波成分のみが残ってくる。特に音として聞こえない、可聴域を下回る低周波音成分によって、建具ががたつくなどの現象を生じ、それによる2次的な発生音が苦情の原因となることが多い。このような現象は発破の規模にもよるが、発破源から数百mから

数km離れた場所にまで現れることが指摘されている¹⁾。このように発破作業に伴う近隣への環境保全を考えた場合、低周波音は影響範囲が広く、また対策も困難だが、その伝搬性状、影響音圧レベルなどは、必ずしも十分解明されているとは言えず²⁾、さらなる調査研究の必要があるものと考えられる。

このような背景のもと、基礎的データの蓄積を図る目的で、いくつかの採石場において発破に伴う衝撃音の計測を実施した。またM系列発破工法など、多段発破の爆破秒時列を調整し発破音の周波数特性を変化させることで、近隣への影響を軽減させる方法に関する実験を行っている。本報告では、調査データ及びベンチ発破におけるM系列発破に関する基礎的検討結果について報告する。

* 飛鳥建設 (株) 技術本部インジニアリング部 Tobisima Corporation

** 資源環境技術総合研究所 National Insutisute for Resources and Environment ,MITI

*** (財) 機械電子検査検定協会 JMI Insutitute

2. 調査方法

発破による衝撃音の調査は、実際の採石場における発破を対象として、以下の2種類の方法によって実施した。

① 実験発破の多点同時計測

② 実操業発破の定点自動計測

前者はベンチ高さ、装薬量などの発破諸元を同一とし、ベンチ面からの距離、角度を一定とした複数点において同時計測を実施した。また、合せて遠距離における定点観測も行った。後者は2ヵ所の定期計測点において実際の操業発破を自動計測したものである。発破諸元、発破地点から測定点までの距離、角度などは発破により異なっている。表-1に調査した発破の諸元及び計測条件を示す。

3. 計測及び解析方法

計測は低周波音レベル計を用いた。この機種は高音圧レベルの衝撃音を含む計測について、圧力センサーとの相互比較により、データの信頼性を確認している^{3)、4)}。実験発破においては、低周波音レベル計の出力をデータレコーダに記録し、実験室にてその再生出力をAD変換し、パソコンにデータファイルとして衝撃音の時間波形を記録した。一方自動計測では、低周波音レベル計とデータロガーの組合せによった。発破音の計測では、比較的遅いサンプリング周波数が利用できることと、継続時間が1~10秒前後であることから、データ量も比較的少なくてすむ。今回の調査ではサンプリング周波数500Hz、(最高周波数250Hz)、データ数5000個(記録時間長10秒)とした。この条件で最大99発破をフロッピーディスクに記録できる。測定は低周波音レベル計の信号をトリガ信号とし、設定した音圧レベル以上になった場合のみ記録するようにした。またデータファイルには同時にトリガの掛った月日時分秒が記録されるので、後日発破記録と突き合せて発破諸元とデータファイルを結びつけた。

データ解析はこのようにして収集したデータをDA変換し、リアルタイムアナライザ、フィルタ、ウェーブレコーダ等を用いて周波数分析、波形解析を実施した。

表-1 調査発破諸元及び計測条件

項 目	範囲(種別)
雷 管	MS(25ms) ()内基準秒時差 DS(250ms) HDS(100ms)
薬 量	240~864kg
段当たり薬量	30~38kg
ベンチ高さ	6.5、10m
孔間隔	2.5~5.0m
段 数	8~28段
孔 数	8~40孔
爆 薬	ANFO
計測点迄の距離	24~2,400m
ベンチ面角度	0~146°

4. 調査データの統計的一考察

ベンチ発破からの発生音の統計的予測式として(1)式が示されている。⁵⁾

$$SPL = 20 \cdot \log_{10}(P_{p, \dots k}) + 85 \\ + 10 \cdot \log_{10}(1 - \exp(-T_d / \tau)) \quad (1)$$

$$P_{p, \dots k} = K_p \cdot W^a \cdot D^{-b} \cdot T^n \cdot S^c$$

ただし、

- SPL : 推定音圧レベル (dB)
- $P_{p, \dots k}$: 推定ピーク音圧値 (Pa)
- T_d : 波形の継続時間
- τ : 時定数
- K_p : 発破による定数
- W : 段当たり薬量 (kg)
- D : 音源からの距離 (m)
- T : $T = (\cos \theta + 2) / 3$
- θ : 観測点とベンチ面法線の成す角度
- S : 段当たりのベンチ面積

図-2は重回帰分析により、 K_p 、 a 、 b 、 n 、 c の各係数を求め、(1)式による推定値と実測値を比較した結果である。雷管種別を分けない場合、重相関係数は0.840と比較的高い値を示したが、標

準偏差は6.553dBとなり、ばらつきが多い。これを雷管種別に分けてみると、DS雷管のみのデータを用いた場合、重相関係数は0.942に向上し、標準偏差も1.509dBに減少した。またHDS+DS雷管を用いたデータのみを用いた場合は、重相関係数は0.996、標準偏差は0.317dBとなった。DS及びHDS+DS雷管は、同じ採石場で自動計測したデータである。薬量、距離、角度などの条件は発破毎に異なり、音源に対する計測器の向きも一定ではないが予測式は発破音を比較的良好に推定している。MS雷管のみのデータを用いた場合、重相関係数は0.941に向上したが、標準偏差は5.5dBとなり比較的良好にばらつきが大きい。MS雷管は2つの採石場における実験計測データであり、実験のため薬量、孔数、ベンチ面積は同条件にしている。従って重回帰分析の説明変数は距離と角度及び波形の継続時間に関する項に限られてくる。このデータは採石場内で直接音源を見渡せる計測点(24~300m)と障害物で音源を見渡せない場外(500~2500m)定点での測定結果を合わせて解析したことから、標準誤差が比較的大きくなったものと思われる。

5. M系列発破と在来発破の比較

M系列発破⁶⁾は多段発破を基準秒時毎の等間隔に爆破させるのではなく、信号処理で用いられるM系列(maximum period null sequence)に従い不等間隔に爆破させることで、基準秒時に相当する周波数での卓越を低減させようとするものである。

M系列は $N=2^n-1$ の周期を持つ2値(0と1)の組合せからなる系列である。例えば、8段の発破をM系列発破とするには、 $N=2^4-1$ として、(2)式の漸化式から求める。

$$X_k = X_{k-3} * X_{k-4} \quad (2)$$

ただし、*印は排他的論理和を表す。

初期値 $X_k (k=0,1,2,3) = 1$ として、

X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
1	1	1	1	0	0	0	1	0
X9	X10	X11	X12	X13	X14			
0	1	1	0	1	0			

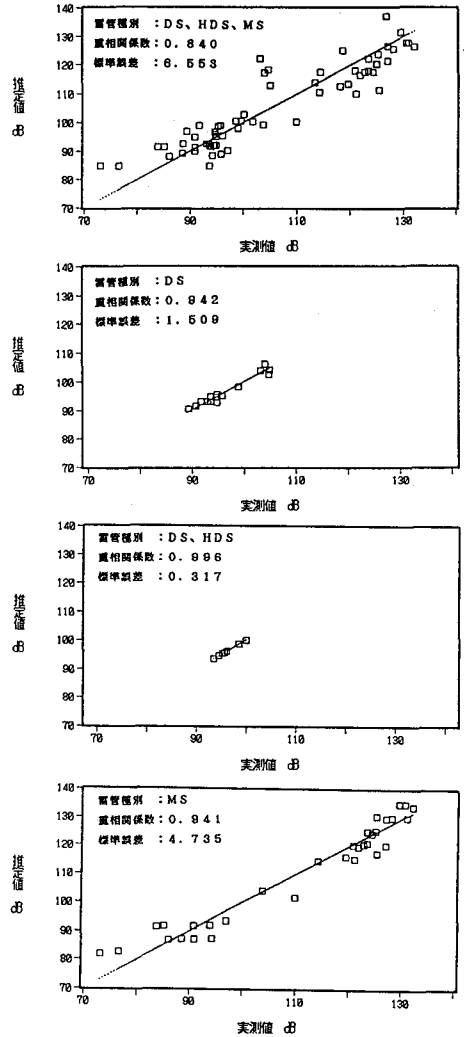


図-1 実測値と(1)式による推定値の比較

となり、 $X_k=1$ の段の雷管を使用すればよい。

図-3はMS 8段の在来発破とM系列発破の時間波形を示したものである。

図-3, a)は基準秒時25msecのMS雷管を想定したシミュレーション波形である。基本となる1発破による波形は、(3)式⁷⁾から求めた。

$$\phi = \phi_m(1-t/td) \cdot \exp(-\alpha t/td) \quad (3)$$

ただし、

ϕ : 時間 t における圧力(Pa)

ϕ_m : $t=0$ のときの最大ピーク過圧 $\phi_m=1500(\text{Pa})$
 t_d : ピーク過圧出現時から圧力が0になるまでの時間 $t_d=0.00528(\text{s})$
 α : 定数 $\alpha=0.99283$

実際の雷管は後段になって秒時が長くなるが、シミュレーションにおいては一定としている。

図-2, b) はベンチ面から100mの距離で計測した実測波形である。発破源から計測点までの伝搬特性の影響もあり、実測波形はa) に示すシミュレーション波形ほど時間軸上での立ち上がりの鋭さがない。また、秒時差は表示される基準秒時と必ずしも一致していない。在来発破、M系列発破とも初めの4段は同じ雷管を使用しているが、実測波形では在来発破のほうが短いように見受けられる。また後段になるほど使用した雷管の表示秒時との差が大きくなっており、M系列発破では在来発破より後段の雷管を使用するため、大きな差がみられる。特に7段目と8段目(雷管では、MS12段とMS14段に相当)の差は著しい。図-2, c) はa) のシミュレーション波形の秒時差を実測値のピーク位置に合わせて作り直したものである。

図-3は、図-2の各波形をAD変換し、BK2131リアルタイムアナライザで1/3オクトーブバンド毎の周波数成分を求めたものである。

図-3, a) に示す基準秒時に従ったシミュレーション波形の周波数成分をみると、在来発破ではMS雷管の基準秒時差(25msec)に相当する40Hzのバンドとその倍音にあたるバンドが卓越している。一方、M系列発破では40Hz、その倍音のバンドでの卓越はみられず、卓越周波数成分の低下に応じて他の周波数成分が上昇している。なお両者のオールパスレベルは同一である。

図-3, b) は実測波形について比較したものであり、実測値のオールパスレベルは発破条件により必ずしも一致しないが、ここではオールパスレベルをそろえて周波数成分を比較した。在来発破ではMS雷管の基準秒時に相当する40Hz、80Hzのバンドに卓越はみられるが、それ以上に16Hzのバンドに卓越がある。またシミュレーションと違い31.5Hz以下の低周波成分はほとんど低減していない。

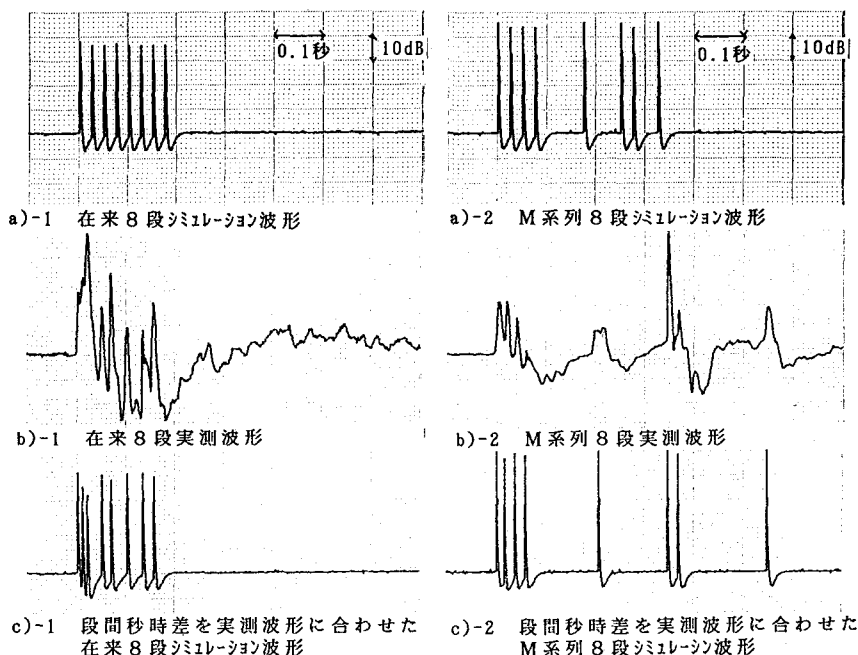


図-2 在来及びM系列発破の時間波形の比較

一方、M系列発破では40Hzとその倍音のバンドでの卓越はみられないが、50Hz、6.3Hzのバンドに卓越がみられる。ただし4Hz以下は在来発破と違い周波数が低くなるほど低減している。

図-3. c) は在来発破についてシミュレーションと実測値を比較したものである。シミュレーション1は基準秒時に相当する場合、シミュレーション2は実測値に秒時を合わせた場合である。シミュレーションでは卓越周波数が8Hz、20Hzに移行している。40Hz、80Hzの鋭い卓越は鈍ってきており、やや実測値に近づいている。しかし16Hz以下のレベルは大幅に異なっている。

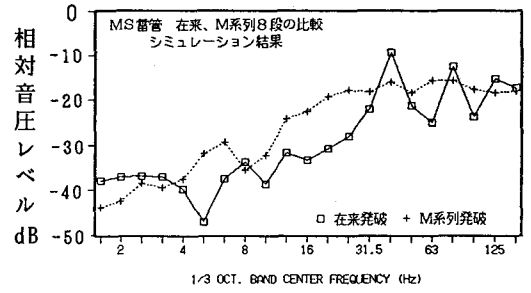
図-3. d) はM系列発破についてシミュレーションと実測値を比較したものである。シミュレーション2では50Hzバンドでの卓越と25Hzバンドでの落ち込みが現れており、実測値に近づいている。16Hz以下では6.3Hzバンドの卓越を含めて、低周波になるほど低減する性状はみられるが、在来発破と同じくレベルは大幅に異なっている。図-2の実測波形では継続時間の短い衝撃的な正圧の後に周期の長い負圧部分がみられる。実測値の数Hz以下の相対音圧レベルが高いのは、この影響によるものではないかと思われる。

図-4は在来及びM系列発破のバンド音圧レベルの時間推移をみたものである。図-2. b) の計測波形を用い、オクターブバンドフィルターを介して、メジャリングアンプのDC出力をデジタルウェーブメモリレコーダに取込み記録した。

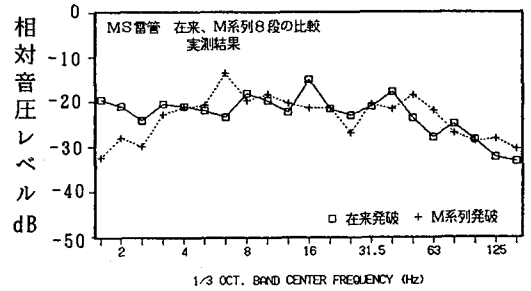
メジャリングアンプのDC出力はPeak、Rise 5dB/ μ s, Decay Fastとした。

図-4の縦軸は相対レベルで表しているが、解析はすべて同じレンジで行い、在来発破とM系列発破の相互比較以外に、直接バンド音圧レベルも比較できるようにしている。A. P. 値をみると、在来発破ではピークは波形の前半に1つであるが、M系列発破では前半と中ほどに2つとなっており、最大値は2つめのピークになっている。これはM系列発破は在来発破8段分の時間経過後にも発破が掛っていることに符合している。

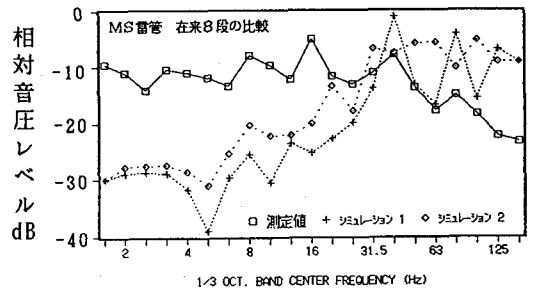
以下バンドごとに両者の違いをみてみると。



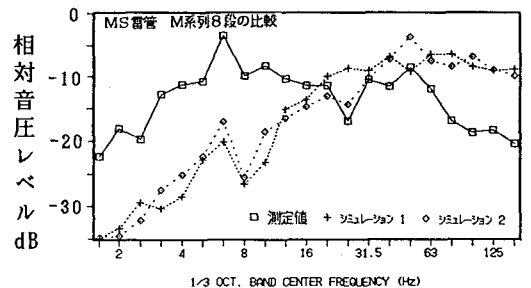
a) 基準秒時差でのシミュレーション波形の場合



b) 実測波形の場合



c) 在来発破の場合



d) M系列発破の場合

図-3 在来及びM系列発破の周波数成分の比較

2Hzでは在来発破の方がピークが大きく、また継続時間も長くなっている。4Hzではピーク時間位置は波形の前半によってくるが、M系列発破では2つに分れている。8HzではM系列のピーク位置は波形中ほどになっている。16Hzは両者に顕著な差がみられ、在来発破は1つのピークを示したが、M系列発破は鋭いピークを示さず、波形の頂上が鋸の刃状の台形となっており、レベルも10dB程度小さくなっている。これは図-3. b) に示した周波数分析結果と符合している。31.5Hz以上では在来発破はほぼA. P. と同じ位置に1つのピークを示したが、M系列発破では2つのピークがはっきりと分れており、2つめのピークの方がレベルが高くなっている。

6. まとめ

収集したデータの重回帰分析による検討とM系列発破による発破音の周波数成分及びレベルの制御効果に関する基礎的検討結果を示した。今後、統計的解析及び波形解析双方の方法により発破音の予測、制御について検討を進める。

謝辞 本報告に関し、発破音の計測にご配慮、ご協力いただいた関係各位に心から感謝する。

参考文献

- 1) 船津他：トンネルと地下 第16巻6号(1985)
- 2) 井清他：環境と測定技術 Vol.18 No.11(1991)
- 3) 井清他：公害 Vol.26 No.6(1991)
- 4) 国松他：資源・素材学会'92(春季大会)
- 5) 国松他：土木学会第44回年次学術講演会資料
- 6) 内田他：環境システム研究 Vol.18(1990)
- 7) 井清他：資源・素材学会誌 107(1991) No.3
- 8) 井清他：資源・素材学会'92(春季大会)
- 9) 井清他：日本騒音制御工学会技術発表会資料
平成2年10月
- 10) 竹中他：日本騒音制御工学会技術発表会資料
平成2年10月
- 11) 井清他：日本機軸学会[No.910-41]環境工学総合シンポジウム'91講演論文集
- 12) 国松他：工業火薬第52巻第1冊
- 13) 井清他：産業公害 Vol.27 No.11(1991)

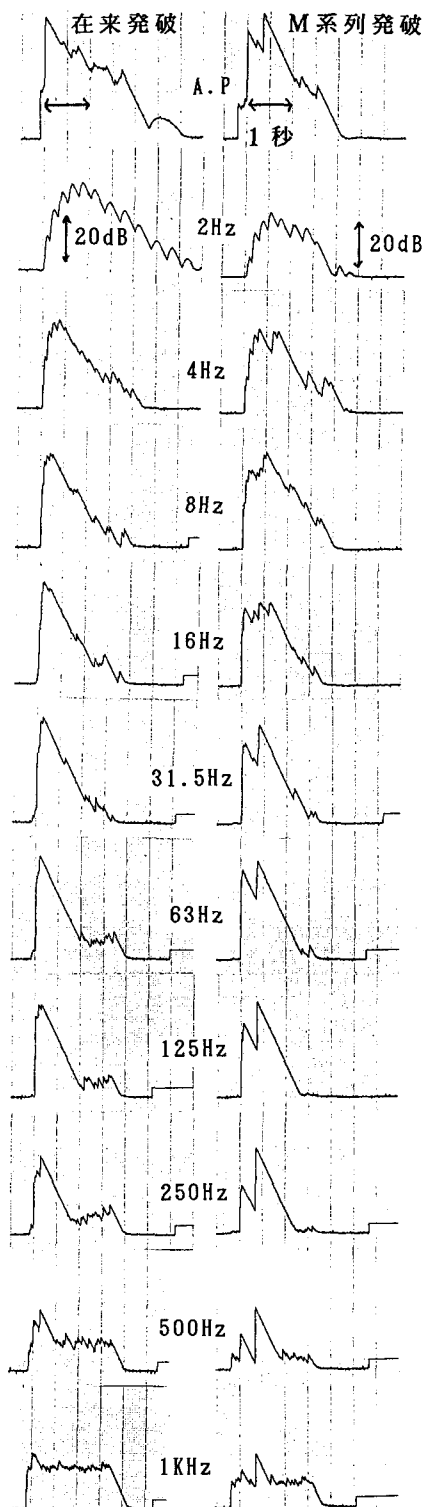


図-4 在来、M系列発破のバンド音圧レベルの時間推移の比較