

(20) M系列信号処理技術を用いた発破
工法による低周波音制御について

STUDY OF LOW FREQUENCY NOISE CONTROL BASED ON NEW BLASTING SYSTEM
BY USE OF THE APPLICATION OF THE MAXIMUM PERIOD NULL SEQUENCE

内田季延* 塩田正純* 安藤四一**
Hidenobu UCHIDA*, Masazumi SHIODA*, Yoichi ANDOU**

ABSTRACT; This paper explains a new blasting theory based on the application of maximum period null sequence (M-sequence). next, outline of the field measurement of a tunnel blasting using this theory is described. about the experiment results, we discuss the availability of the new blasting theory in order to control low frequencies component using peak shift in the spectrum of low frequency noise caused by blasting.

KEY WORDS; low frequency noise, blasting system, maximum period null sequence,

1. はじめに

ダムやトンネルなどの工事における発破作業に伴って発生する、振動、騒音、低周波音などは、近隣に民家などの無い山間部で行われているうちは、それらが環境問題を生じることも無く進められてきたであろうが、最近では市街地またはその周辺においても発破作業が実施される機会が多くなり、発破による環境公害的要素に対する取組みが、重要視されるようになってきている。

発破作業を環境公害的要素として捉えた場合、発破によって生じる振動、騒音、低周波音あるいは粉じん、破片の飛散などの環境項目が考えられる。このうち特に厄介なのが低周波音であり、比較的市街地あるいは人家に近い所に建設されることが増えているトンネル掘削時の発破作業に伴う低周波音が問題となる場合が増えてきている。

低周波音とは波長の長い、いわゆる低い音あるいは低周波空気振動であるが、その周波数範囲に関する定義や測定・評価方法等は確立されていないのが現状である。

一般に人の耳に聞える音の周波数範囲は20～20,000Hzとされている。低周波音の周波数範囲の定義には20Hz以下の聞えない音のみを対象とするものから、100Hz前後までの低い周波数範囲の可聴音を含めるものまで提案されているが、ここでは後者の定義により、聞えない音から可聴領域までの音を対象に考える。

低周波音はガラス窓や戸、障子を振動させたり、人体に影響を及ぼしたりするとして苦情が発生しているものであり、これまで振動による影響と混同されていた部分もあったが、研究が進に連れ、原因が低周波音であることが認識されるようになってきた、学問的には比較的新しい問題である。

トンネルの掘削に伴う発破作業によって発生する低周波音には、以下のようなトンネル発破特有の特徴がみられる。

1) 発破音の継続時間は短かいが、ピークレベルが高いので、エネルギーの大きな衝撃音であり、そのスペクトルは可聴音ばかりでなく、可聴領域以下の低周波数成分も含んでいる。

*飛鳥建設(株)技術本部インジニアリング部 Engineering division, Technical headquarter, Tobishima corporation
**神戸大学工学部環境計画学科 Environmental acoustics laboratory, Faculty of engineering, Kobe university

2)音圧振幅が非常に大きい。

3)多段発破によるスペクトルの卓越がみられる。

4)低周波音はトンネル内ではほとんど減衰しない。

5)坑口から放射される低周波音には指向性が無い。

などが、既往の研究により明らかにされている。そして、これらの特徴がトンネル発破による低周波音の対策を難しくしている要因である。すなわち、トンネル坑口から放射される低周波音は爆源（発生源）からトンネル内をほとんど減衰せず1次元的に伝搬してきたものであり、発生した音のエネルギーは自由空間での発破のように周囲に広がること無く坑口という狭い空間に集中することになり、トンネル外へ放射される音圧は非常に大きなものとなる。一方これらの対策として用いられる防音扉などには性能的、あるいは実施工事的に自ずと限界があり、発破自体の制御により、低周波音の発生を抑制することが望まれている。

このような観点から、トンネル発破などに用いられる、多段式の発破における爆破の秒時系列を制御する方法に着目して、信号処理理論の1つであるM系列の概念を用いて爆破することで、発破に伴って発生する低周波音の特性を制御するM系列発破工法を考案した。本書はその原理と実際にトンネル発破において在来発破との比較検討を行った結果を報告するものである。

2. 在来発破とM系列発破

2. 1 在来発破工法

多段発破における在来発破工法での爆破の秒時系列は、一般にMSあるいはDSと呼ばれる雷管により、25msとか250msという決まった時間間隔で起爆される。

ここで、時間間隔を τ として、N段の発破の音圧の時間波形を $p(t)$ とすると、

$$p(t)=aS(t)+aS(t-\tau)+aS(t-2\tau)+\cdots+aS\{t-(N-1)\tau\} \quad (1)$$

と表される。ただし、 a は発破の大きさに関する係数である。次に、(1)式をフーリエ変換して、周波数領域にすると、

$$p(\omega)=aS(\omega)\sum_{n=0}^{N-1}e^{-j\delta n\omega\tau}=aS(\omega)K(\omega) \quad (2)$$

ここで、 ω は角周波数、 $k(\omega)$ は爆破の時系列に関するスペクトルである。例えば、 $\omega=0$ もしくは $2\pi/\tau$ の時、 $k(\omega)=N$ となり、一発の発破のN倍の圧力になる。特に、 $\omega=2\pi/\tau$ の周波数でのスペクトルピークは甚大となり、これが衝撃波となって周辺住民に対して被害をもたらしているものと推察される。

3. 2 M系列発破

M系列発破は多数の爆薬を基本周期 τ に対してM系列(Mximum null period sequence)に従った整数倍の時間間隔で起爆することを特長とする。すなわち、発破時系列 δn として、M系列またはその一部を使用するものである。

M系列は n 個の変化要素が 2^n-1 の周期をもつ2値(0と1)で構成される時系列であり、例えば、

$$f(x)=\sum_{i=0}^n c_i x_i = 1 + c_1 x_1 + \cdots + c_n x_n = 0 \quad (3)$$

の関係を、和を”2を法とする和”に置き換え、

$$\sum_{i=0}^n c_i x_{k-i} = 0 \quad (4)$$

とする。これを x_k について解いた式

$$x_k = c_1 x_{k-1} + c_2 x_{k-2} + \cdots + c_n x_{k-n} \quad (5)$$

が一般のM系列を作り出す公式となる。初期値として、 $x_k(k=0, \cdots, n-1)$ にはすべてが0以外なら何を与えてもよい。

例えば、図-1.に示すような基準とする時間間隔 $\tau=250\text{ms}$ のDS10段の発破を考えると、在来発破では図のように0, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250msで起爆させているが、M系列発破では、5, 3, 7及び9, 10, 13, 15をおやすみして、0, 250, 500, 750, 1750, 2500, 2750, 3250, 3750, 4000msで起爆させる。この例は $n=4, k=3: N=2n-1=15$ の時である。

M系列発破も(2)式で表されるが、この場合爆

破の時系列に関するスペクトルである
 $k(\omega)$ はその基本周期を $N' = 2^k - 1$
 とすると、M系列信号の特徴により、

$$k(\omega) = \frac{\sqrt{(N' + 1)}}{N'} \quad (6)$$

となる。従って、在来発破とのレベル
 差をとれば、その最大効果Eは、

$$E = 10 \log \left(N \cdot N' / \sqrt{(N' + 1)} \right) \quad (7)$$

で表される。例えば前述の10段の発破を考えると、
 $N = 10, N' = 15$ とすれば、 $E \approx 16\text{dB}$ となる。

4. 実験結果

4.1 実験条件

実験は図-2. に示すようなトンネルで行った。
 坑口から約100m進行した位置に切羽があり、坑口
 には厚さ200mmのコンクリート製の扉が付いてい
 る。A地点は扉の前5m、B地点はそこから150m離
 れた、集落近傍とし、在来発破及びM系列発破を
 交互に2回づつ行い、両者を比較することで、M
 系列発破の効果を確認した。表-1. に示すように、
 在来発破における発破条件は、段数10段、段当り
 の最大薬量20kg、総薬量97.4kgのDS発破であり、
 発破の秒時間隔は250msとなっている。従って、
 前述の定義によれば、 $f = 1/0.25 = 4\text{Hz}$ が卓越す
 ることが予想される。

図-3. a), b) はそれぞれ在来発破及びM系列発破
 の発破パターンである。図から分かるように、こ
 の発破工法では削孔のパターンは在来法とまったく
 同じであり、違いは、図中の○内数字で示した
 雷管の段数だけである。従って、削孔から爆薬の
 装填作業までの手間は在来発破の場合と変わらない。
 実際の作業では、作業員の慣れの問題もあって、
 M系列発破の場合、雷管の結線に在来より若干時
 間を要しただけである。

低周波音の測定は低周波レベル計（リオン製
 NA17）を用い、地表面から1.5mの高さに三脚で支
 持し、データレコーダに一旦データを記録した後、
 リアルタイムアナライザ（B&K製
 2131）を用いて1/3 octave バンド
 分析を行った。

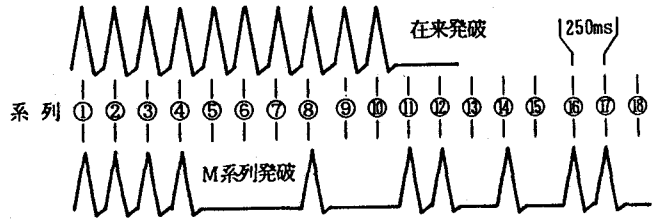


図-1. 在来及びM系列発破の発破秒時列

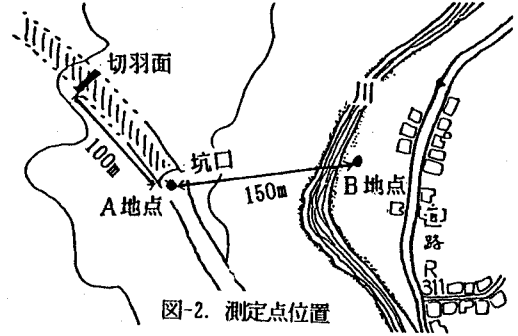
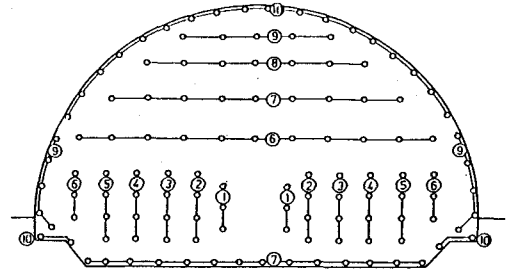
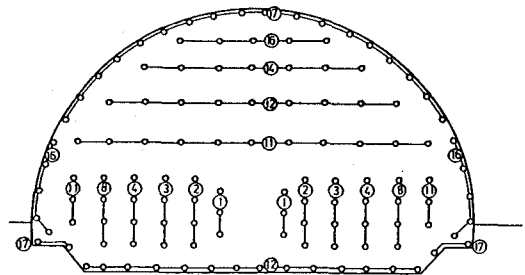


図-2. 測定点位置



a) 在来発破



b) M系列発破

図-3. 発破パターン

表-1. 在来発破時の発破条件

段 数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
孔 数	6	8	8	8	8	17	25	7	15	20
孔当り薬量(Kg)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
段当り薬量(Kg)	4.8	6.4	6.4	6.4	6.4	13.6	20.0	5.6	12.0	16.0

4.2 実験結果

図-4.に発破による低周波音の時系列データの測定結果を示す。トンネル発破の場合、心抜きと呼ばれる1段目の発破では発破により破碎された岩石の逃げる面(自由面)が1面しかないため、一般に、薬量の多い後段よりも騒音、振動が大きくなることが知られている。この傾向はM系列発破においても同様である。今回はM系列発破においても秒時間隔250mSのDS雷管を使用したため、在来発破では約3秒ほどで全段の発破を終了しているのに対し、M系列発破では途中で休止する段があるので7秒程度かかっている。なお、秒時間隔250mSの雷管で10段であれば2.25秒で終了する筈であるが、実際にはこの程度の誤差がある。

今回は厳密な検討はできなかったが、どの程度の秒時誤差までが許容されるかは実務上重要な問題である。

図-5.及び図-6.は、それぞれA地点における在来発破及びM系列発破の測定結果をリアルタイムアナライザーのMAXホールド機能を使い、周波数ごとの最大値をプロットしたものである。在来発破では2回の測定結果は周波数特性までほぼ一致した。A.P.値は134dBで、3Hz、6Hz、25Hzにピークが見られ、25Hzで最も卓越している。一方、M系列発破では1回目比2回目はかなり小さく、A.P.値は1回目が134dBに対し、2回目は129dBとなった。これは2回目の発破では一部ずりの状態の良くない部分があったことから、発破の掛りが最適で行われなかったことによるものと思われる。

M系列発破では在来発破で見られた3Hz、6Hzのピークはみられず、16Hz、31.5Hzにピークがあり、31.5Hzで最も卓越しており、在来発破とは周波数特性が変化していることが分かる。

今回は実際のトンネル工事現場での実験であったため、M系列発破も在来発破と同じ秒時列のDS雷管を用いたので、M系列化することによる効果は、在来発破でスペクトルの卓越が生じる4Hzあたりにあるものと推定される。

図-7.は在来発破及びM系列発破それぞれ1回目の実験結果どうしを比較したものである。図中、灰色でハッチングした部分がM系列発破の効果が

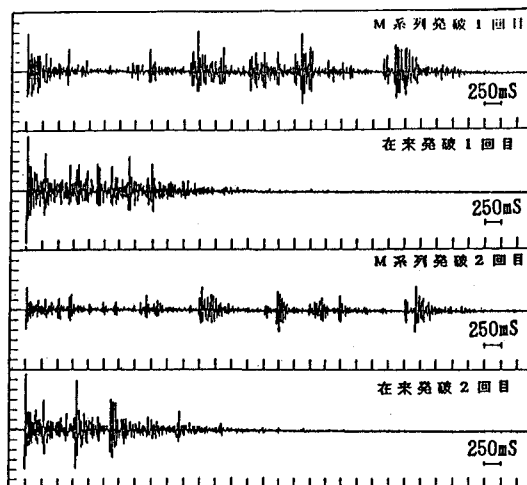


図-4. 発破による低周波音の時系列データ

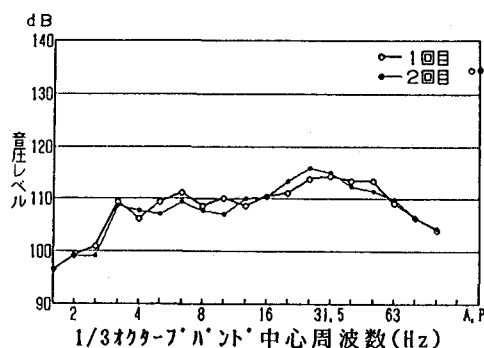


図-5. A地点での在来発破時の低周波音測定結果

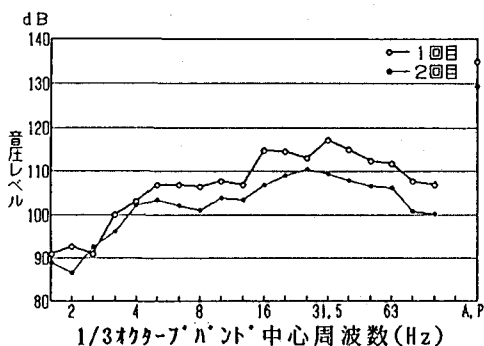


図-6. A地点でのM系列発破時の低周波音測定結果

みられる領域である。図のように、1.6～2Hzでは6～7dB、2.5～3Hzでは約10dB、4～12.5Hzでは2～4dBそれぞれM系列発破の方が在来発破より音圧レベルが低くなっている。

在来発破において、1/3オクターブ・バンド中心周波数3HzにみられるピークがM系列発破ではみられなくなっていることから、ほぼ予想どおりの結果が得られているものと思われる。しかし、16Hz以上ではM系列発破の方が在来より大きくなっているため、A.P.値ではほとんど同じ値となっている。

図-8は実務的価値としてのM系列発破の効果を示すものである。図はB地点での在来発破及びM系列発破の実験結果と低周波音による窓などの建具のがたつきの限界を比較して示したものである。すなわち、在来発破では2.5Hzにあるピークががたつきの限界を越えているのに対し、M系列発破ではピーク周波数が3.15Hzに移り、大きさも小さくなっているのががたつきの限界を下回っている。この程度の低周波音圧レベルでは、人体に感じることはなく、一般に建具のがたつきなどの物理的現象により、その影響を感じている。従って、このようにピーク周波数を制御することで、低周波音の影響を意識させないようにすることが可能と思われる。

5. おわりに

発破作業に伴って発生する低周波音制御の1方法として、多段発破における爆破の秒時列を信号処理理論の1つであるM系列に従って起爆させるM系列発破工法を考案した。この発破工法は削孔パターンなどはこれまでの多段発破とまったく同じであり、発破の秒時列を変えることによりスペクトルの卓越周波数をシフトさせることで低周波音を制御しようとするものである。1例ではあるがトンネル発破における実験結果から、同工法の有効性を確かめた。しかし秒時間隔の誤差の問題やM系列の最適基本秒時間隔の設定方法、雷管の開発など今後の研究に負う部分が多い。

発破工法は、土木工事ばかりでなく、近い将来には日本においても都市構造物の解体に本格的に利用されるような時期が来るものと思われる。そ

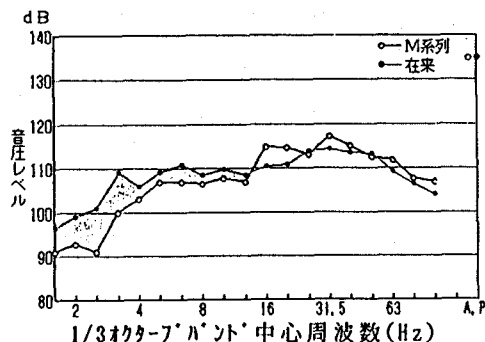


図-7. A地点での在来発破とM系列発破の比較

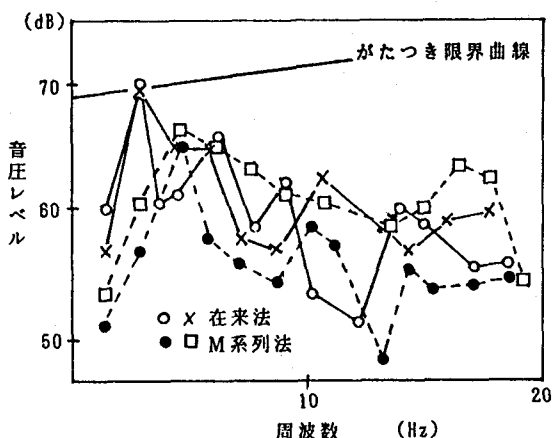


図-8. 各周波数ピークの音圧レベル

のような状況では、騒音、振動などの環境項目に要求される仕様はより厳しいものになってくるものと推察される。本発破工法の研究をさらに進め、低周波音ばかりでなく騒音、振動の制御まで行えるようにし、より広範な環境保全に役立つようにしていきたい。

参考文献

- ・磯部 孝：相関函数およびスペクトル
- ・宮川 洋 他訳：高速フーリエ変換
- ・工業火薬協会編：新・発破ハンドブック
- ・環境庁大気保全局：低周波空気振動調査報告
- ・塩田他：トンネル発破から発生する低周波音について〔日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集 昭和61年9月〕
- ・塩田他：発破による低周波音について〔日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集 昭和62年9月〕